Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido: 08/12/2024 Aprobado: 18/01/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n1.87

Bioplásticos a partir de Almidón Modificado: Avances en Propiedades y Biodegradabilidad

Kelly Estefanía Vaca Ulloa
https://orcid.org/0009-0002-1525-9253
estefaniavacaulloa@gmail.com
Universidad Técnica de Cotopaxi
Ecuador-Quito

Paulina Gabriela Mena Pástor
paulina.mena4623@utc.edu.ec
https://orcid.org/0009-0009-2239-5828
Universidad Técnica de Cotopaxi
Ecuador-Latacunga

Paulina Stephanie Saquicela Cruz
paulina.saquicela1521@utc.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-5104-9758
Universidad Técnica de Cotopaxi
Ecuador-Latacunga

RESUMEN

Esta revisión explora los avances en bioplásticos a base de almidón modificado, analizando cómo diferentes técnicas de modificación mejoran sus propiedades mecánicas, térmicas y su capacidad de biodegradación. Se investigaron métodos químicos, físicos y enzimáticos que aumentan la resistencia y estabilidad del material, aunque aún hay desafíos en cuanto a durabilidad y costos de producción. Se recopilaron estudios recientes en bases de datos como ScienceDirect y SpringerLink, comparando bioplásticos de almidón puro con los modificados. Los resultados muestran que la reticulación química con agentes como STMP y ácido cítrico mejora la estabilidad térmica y la resistencia al agua, mientras que el uso de plastificantes como glicerol aumenta la flexibilidad sin afectar la resistencia mecánica. Además, la incorporación de nanocelulosa refuerza las propiedades mecánicas. Aunque las modificaciones han mejorado el rendimiento de estos bioplásticos, aún se enfrentan desafíos en términos de costos y biodegradabilidad. Se recomienda seguir investigando para optimizar las formulaciones y explorar alternativas más sostenibles y económicas, con el fin de consolidar a los bioplásticos de almidón como una opción viable frente a los plásticos tradicionales.

Palabras clave: modificación del almidón, alternativas biodegradables, sostenibilidad

Bioplastics from Modified Starch: Advances in Properties and Biodegradability

ABSTRACT

This review explores advances in modified starch-based bioplastics, analyzing how different modification techniques improve their mechanical properties, thermal properties and biodegradability. Chemical, physical and enzymatic methods that increase the strength and stability of the material were investigated, although challenges remain in terms of durability and production costs. Recent studies were compiled from databases such as ScienceDirect and SpringerLink, comparing pure starch bioplastics with modified ones. The results show that chemical crosslinking with agents such as STMP and citric acid improves thermal stability and water resistance, while the use of plasticizers such as glycerol increases flexibility without affecting mechanical strength. In addition, the incorporation of nanocellulose enhances the mechanical properties. Although the modifications have improved the performance of these bioplastics, challenges are still faced in terms of cost and biodegradability. Further research is recommended to optimize formulations and explore more sustainable and economical alternatives in order to consolidate starch bioplastics as a viable option to traditional plastics.

***Keywords**:* starch modification, biodegradable alternatives, sustainability

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creciente contaminación plástica, responsable de la muerte de millones de animales, incluidos aves y criaturas acuáticas, ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles a los polímeros sintéticos (Nanda et al., 2022). Como resultado, se ha desarrollado un gran interés en los bioplásticos derivados de recursos renovable. Dentro de estos, el almidón destaca por su abundancia, bajo costo y biodegradabilidad (Navarrete et al., 2023); en su forma natural, es un ingrediente muy versátil con múltiples usos en la industria alimentaria y de empaques (García-Guzmán et al., 2022). Se utiliza como espesante, gelificante, texturizante y encapsulante, además de ser una materia prima para crear películas biodegradables que funcionan como envases sostenibles (Cardozo Becerra & Puerto Torres, 2019). Sin embargo, su uso presenta ciertas limitaciones debido a su baja solubilidad, su tendencia a descomponerse con el calor (S. X. Tan et al., 2022), la facilidad con la que retrograda (cambiando su estructura con el tiempo), su poca resistencia a los ciclos de congelación y descongelación, y su propensión a liberar agua, un fenómeno conocido como sinéresis (Egharevba, 2019).

El almidón está compuesto principalmente por amilopectina, que puede representar hasta el 80% de su estructura, mientras que la amilosa se encuentra en menor proporción (20-30%) (Varghese et al., 2022). Esta composición influye directamente en sus propiedades tecnológicas, como su capacidad para formar películas y recubrimientos (Viana et al., 2022). Para optimizar estas características, se han explorado diversas estrategias de modificación, ya sean químicas, físicas o enzimáticas (Garcia et al., 2020), con el objetivo de desarrollar bioplásticos con mejores propiedades estructurales y funcionales.

Las modificaciones físicas, como la ultrasonicación o el uso de autoclave, han demostrado ser efectivas para mejorar las propiedades fisicoquímicas de las películas de almidón (Rosicka-Kaczmarek et al., 2018). Por otro lado, las modificaciones químicas, conocidas como derivatización, permiten alterar la estructura del almidón para potenciar su resistencia y capacidad de barrera (Gałkowska et al., 2023). Entre las técnicas más comunes destacan la esterificación (como la acetilación), la eterificación (como la hidroxipropilación) y la oxidación (Abe et al., 2021). Aunque los métodos enzimáticos también ofrecen

alternativas interesantes, su uso es limitado debido a la complejidad de los procesos y al tiempo prolongado que requieren (Jayarathna et al., 2022).

A pesar de las diversas estrategias de modificación existentes, el almidón modificado aún enfrenta desafíos relacionados con sus propiedades mecánicas y físicas, así como con la reducción de costos de producción (Zarski et al., 2021). Según Hossain et al. (2024), la investigación sigue avanzando en el desarrollo de nuevas formulaciones, procesos y aditivos que optimicen el rendimiento de los bioplásticos y los hagan más adecuados para distintas aplicaciones, minimizando su impacto ambiental. En este contexto, esta revisión analiza los avances recientes en bioplásticos a base de almidón modificado, evaluando cómo las distintas técnicas de modificación afectan sus propiedades y biodegradabilidad. Además, busca identificar los principales retos y oportunidades de mejora que permitan ampliar su uso en la industria y consolidarlos como una alternativa sostenible a los plásticos convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se enfocó en analizar los avances recientes en la producción de bioplásticos elaborados a partir de almidón modificado, con el propósito de evaluar el impacto que distintas técnicas de modificación ejercen sobre sus propiedades mecánicas, térmicas y biodegradabilidad. Para ello, se realizó un proceso de recopilación y análisis de literatura científica relevante publicada entre 2019 y 2024.

La selección de fuentes se llevó a cabo a través de bases de datos reconocidas en el ámbito de la ciencia de materiales y biopolímeros, como ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, Scopus y Web of Science, con el fin de garantizar la calidad y actualidad de la información. Se priorizaron estudios que abordaran la modificación química, física y enzimática del almidón, además de evaluar sus propiedades mecánicas y térmicas. También se consideraron investigaciones sobre el impacto de estas modificaciones en la velocidad de degradación en diferentes entornos como suelo, agua y compostaje, y se analizó la influencia de plastificantes y compuestos de refuerzo en las características mecánicas y la biodegradabilidad de los bioplásticos de almidón.

Para los criterios de inclusión, se priorizaron publicaciones en revistas indexadas y revisadas por pares para garantizar la rigurosidad científica. Se incluyeron investigaciones experimentales sobre bioplásticos a base de almidón que detallan su modificación y evalúan sus propiedades fisicoquímicas, así como aquellas que analizan su biodegradabilidad en condiciones controladas. También se consideraron estudios con datos cuantificables sobre resistencia mecánica, estabilidad térmica y capacidad barrera. Además, se incluyeron publicaciones en inglés y español para ampliar el acceso a información relevante. Por otro lado, se descartaron investigaciones centradas en bioplásticos elaborados con otros polímeros naturales, como quitina o proteínas, por no estar alineadas con el enfoque del estudio. También se excluyeron artículos sin datos experimentales, como revisiones teóricas o editoriales, que no permitieran una comparación cuantitativa de resultados. Finalmente, se dejaron fuera reportes técnicos y patentes sin revisión por pares, al no contar con la validación científica necesaria.

Los datos recopilados se analizaron de forma crítica para identificar tendencias, desafíos y oportunidades en el uso de bioplásticos de almidón modificado. Se enfocó en comparar el rendimiento mecánico y térmico de los bioplásticos de almidón puro frente a los modificados. También se evaluó cómo influyen los distintos métodos de modificación (química, física y enzimática) en las propiedades del material, así como el impacto de los plastificantes y refuerzos en la biodegradabilidad y funcionalidad de los bioplásticos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modificación del Almidón para la Producción de Bioplásticos

Modificación Química

La modificación química se ha consolidado como una de las técnicas más utilizadas para mejorar las propiedades funcionales del almidón, ya que permite optimizar su estabilidad molecular, aumentar su resistencia al cizallamiento, controlar su viscosidad y reducir su tendencia a la retrogradación (Garcia et al., 2020). Entre los métodos más comunes destacan la hidrólisis ácida, la reticulación, el injerto de almidón, la modificación dual, la oxidación y la acetilación o esterificación (Haq et al., 2019). Por ejemplo, los almidones acetilados son ampliamente valorados en la producción de películas biodegradables

debido a su mayor resistencia a la tracción, mejor capacidad de alargamiento y una estructura más uniforme (Panrong et al., 2020).

La reticulación, en particular, juega un papel clave en la mejora de las propiedades mecánicas y la resistencia al agua de los bioplásticos. Este proceso utiliza agentes como el trimetaftasfato de sodio (STMP) y el tripolifosfato de sodio (STPP) para formar enlaces covalentes entre las moléculas de almidón, lo que incrementa la estabilidad y durabilidad de las películas (Wilpiszewska et al., 2019). Además, el ácido cítrico, un agente reticulante natural, también se emplea para mejorar la resistencia térmica y la impermeabilidad al agua de estos materiales (Gerezgiher & Szabó, 2022). Además, la combinación de técnicas físicas y químicas ha demostrado ser una estrategia eficaz para potenciar aún más las propiedades de los bioplásticos a base de almidón, abriendo nuevas posibilidades en su aplicación industrial.

Modificación física

Las modificaciones físicas del almidón se destacan por ser opciones más accesibles y económicas en comparación con las técnicas químicas, además de tener un menor impacto ambiental al no generar residuos contaminantes como sales, reactivos o subproductos (Gill et al., 2018). Entre estos métodos, el tratamiento asistido por microondas es uno de los más utilizados en la elaboración de películas de almidón, ya que mejora su solubilidad en agua y reduce la cristalinidad, la viscosidad y la transparencia del material (Amaraweera et al., 2021).

Otra técnica relevante es la ultrasonicación, que utiliza ondas sonoras de alta frecuencia, superiores al rango audible por el ser humano, para modificar el almidón (Rosicka-Kaczmarek et al., 2018). Este tratamiento puede aplicarse tanto al almidón gelatinizado como a gránulos nativos suspendidos en solución, generando superficies porosas y modificando propiedades fisicoquímicas clave, como la solubilidad, el poder de hinchamiento y las características de pegado (Hu et al., 2019). Investigaciones han evidenciado que los gránulos sometidos a este proceso adquieren superficies irregulares y formas angulares (Carmona-García et al., 2016), lo que mejora la claridad de las pastas de almidón, un atributo esencial para su uso en recubrimientos y películas comestibles.

La esterilización en autoclave es otra técnica física que expone el almidón a altas temperaturas y presión, modificando su estructura cristalina y permitiendo la creación de películas más estables y homogéneas, adecuadas para diferentes aplicaciones (Ulyarti et al., 2022). Además, la combinación de esta técnica con otros métodos, como la ultrasonicación o la reticulación química, potencia aún más las propiedades de los bioplásticos derivados del almidón. Por último, la adición de plastificantes como glicerol y sorbitol mejora la flexibilidad y la procesabilidad del almidón sin afectar negativamente sus propiedades mecánicas (Pooja N. et al., 2024), ampliando así sus posibilidades de uso en aplicaciones industriales y sostenibles.

Modificación enzimática

El almidón modificado enzimáticamente ha encontrado un amplio rango de aplicaciones tanto en la industria alimentaria como en sectores no alimentarios, incluyendo productos farmacéuticos y sistemas de liberación controlada de fármacos (Adewale et al., 2022). Este proceso implica el uso de enzimas específicas, conocidas como hidratasas, que aceleran la producción de derivados del almidón con propiedades altamente funcionales (Singh et al., 2023). Las principales enzimas involucradas en esta conversión son las endoamilasas, exoamilasas, enzimas desramificantes y transferasas, cada una con funciones específicas en la modificación del almidón (Das & Kayastha, 2023).

El objetivo clave de esta técnica es despolimerizar el almidón, rompiendo el enlace α-1,4 entre las unidades de glucosa para generar oligosacáridos o alterar la estructura del almidón mediante la transferencia de enlaces y residuos glucosídicos (S. Wang et al., 2020). Gracias a esta versatilidad, el almidón modificado enzimáticamente se utiliza en una variedad de productos, desde alimentos y cosméticos hasta detergentes, adhesivos y fluidos para perforación (Goswami & Mahanta, 2021). Esta flexibilidad amplía sus aplicaciones industriales, destacando su potencial como materia prima sostenible en diferentes sectores.

El almidón modificado enzimáticamente ha demostrado ser una excelente opción en la industria alimentaria gracias a sus propiedades mejoradas, como una mayor suavidad, frescura y una vida útil prolongada en productos horneados (Park et al., 2017). Un ejemplo de esto es el estudio de Le Loan et

al. (2021), donde se desarrolló pan de arroz sin gluten utilizando β-amilasa y d-enzima, logrando una textura y calidad superiores. Además, la investigación de Montoya et al. (2020) exploró la acilación del almidón mediante la B-lipasa de *Candida antárctica*, destacando el potencial del almidón de arroz acetilado en sectores como la industria farmacéutica y cosmética, gracias a sus propiedades funcionales mejoradas.

En el ámbito farmacéutico, el almidón modificado enzimáticamente destaca especialmente por su capacidad de liberar fármacos de manera controlada y a una velocidad constante, optimizando la eficacia de los tratamientos (Hong et al., 2016). Esta característica lo convierte en un material clave para el diseño de sistemas de liberación prolongada y aplicaciones terapéuticas específicas.

Evaluación de Propiedades Mecánicas y Térmicas

Las películas elaboradas a partir de almidón se distinguen por tener limitadas propiedades mecánicas y baja efectividad como barrera (Wang et al., 2020), por lo que es esencial realizar la comparación de las propiedades mecánicas y térmicas de los bioplásticos de almidón puro frente a los bioplásticos de almidón modificado.

De acuerdo con la investigación de (Posada & Montes, 2022) sobre la "Obtención y caracterización de bioplásticos a partir de almidón acetilado de semillas de aguacate", se observó que las fuerzas de tensión fueron de 0,87 MPa al usar sorbitol como plastificante y 0,33 MPa al usar glicerol. Estos hallazgos evidencian que el sorbitol incrementa notablemente la resistencia a la tensión frente al glicerol. Además, se registró una fuerza de tensión de 16,35 MPa, mientras que las películas elaboradas con almidón en su estado nativo mostraron una fuerza de tensión de 9,04 MPa. Evidenciando con ello que las propiedades mecánicas mejoraron notablemente.

Según (Vásquez, 2020) en su trabajo acerca de la producción de biopolímeros a partir de almidón de papa para su utilización en el envasado de alimentos, se realizó una modificación del almidón empleando un ácido acético del 5% consiguiendo un polímero que constaba del 61,76% de amilosa y del 38,28% de amilopectina y las evaluaciones de alargamiento y tracción demostraron que el almidón modificado evidenció avances notables en sus características mecánicas en comparación con el almidón

sin alteraciones esto puede deberse a la naturaleza hidrofílica y la alta densidad del almidón dan lugar a bioplásticos que son higroscópicos y frágiles (Gonçalves et al., 2020).

Influencia de plastificantes y compuestos de refuerzo

La incorporación de plastificantes en los bioplásticos de almidón contribuye a que estos sean más flexibles y sencillos de procesar. Un estudio reciente evaluó diferentes tipos de plastificantes en bioplásticos elaborados con almidón de papa criolla cuyos resultados revelaron que, al combinar ácido acético con glicerol, se lograban materiales que no solo absorbían menos agua, sino que también presentaban mayor resistencia en entornos ácidos (Vargas & Medina, 2019).

Combinar nano celulosa como un refuerzo en los bioplásticos de almidón ha demostrado un efecto beneficioso en sus características mecánicas. Una investigación reciente empleó celulosa microcristalina para generar nano celulosa y la combinó con almidón termoplástico, lo que condujo a un incremento significativo en la elasticidad del producto final (Neciosup et al., 2023). Incorporar subproductos agroindustriales como las cáscaras de mango, los cálices de jamaica y los residuos de café en bioplásticos de almidón-gelatina potencia sus características mecánicas; una investigación reciente evidenció que estos aditivos elevan la dureza del material de 190 N a 290 N, gracias a la compatibilidad entre sus elementos (Salazar et al., 2021).

Biodegradabilidad de los bioplásticos de almidón

Bioplásticos de almidón puro

El almidón puro es un polisacárido natural fácilmente degradado por microorganismos presentes en el suelo y el agua (Dilshad et al., 2021). Su estructura amorfa facilita la acción de enzimas y bacterias (L. Tan & Kong, 2020). En condiciones óptimas de humedad, temperatura y actividad microbiana adecuadas, los bioplásticos de almidón pueden degradarse en pocas semanas (Ahimbisibwe et al., 2019). Estudios han demostrado que los bioplásticos de almidón puro pueden degradarse en un periodo de hasta 40 dias en condiciones óptimas de compostaje (temperaturas de 50-60°C y alta humedad) (Zaborowska et al., 2024). Debido a su alta hidrofilicidad, los bioplásticos de almidón puro presentan baja resistencia

mecánica y estabilidad en medios húmedos (Jayarathna et al., 2022), lo que limita su aplicación en envases o materiales de uso prolongado.

Bioplásticos de almidón modificado

La modificación química o física del almidón puede alterar su tasa de degradación. Algunos tratamientos mejoran la resistencia al agua y la estabilidad térmica, lo que ralentiza la biodegradación (Z. Wang et al., 2022). Modificaciones como la acetilación, la reticulación o la incorporación de aditivos plastificantes (como glicerol o sorbitol) pueden reducir la solubilidad en agua y prolongar la vida útil del material antes de su degradación (Pooja N. et al., 2024). Dependiendo del tipo de modificación, se pueden diseñar bioplásticos con tasas de degradación ajustadas a aplicaciones específicas, como envases de un solo uso o biomateriales de liberación controlada (Ibrahim et al., 2021).

Por ejemplo, la introducción de grupos acetilo disminuye la afinidad por el agua, reduciendo la velocidad de biodegradación. En estudios, bioplásticos acetilados mostraron tiempos de degradación de 60 a 90 días en compostaje (Kim et al., 2020). Ademas, el uso de agentes como STMP o ácido cítrico crea enlaces covalentes entre las moléculas de almidón, generando materiales más resistentes al agua y con una degradación más lenta (90-120 días) (Wilpiszewska et al., 2019). Inclusive la introducción de grupos carbonilo y carboxilo en la estructura del almidón, lo que puede acelerar la biodegradación al hacer el material más susceptible al ataque microbiano (degradación en 30-50 días) (Abe et al., 2021).

Tabla 1. Comparación de biodegradabilidad del almidón puro y modificado

Tipo de Bioplástico	Tiempo de Degradación (Compostaje)	Resistencia al Agua	Flexibilidad
Almidón Puro	20-40 días	Baja	Media
Almidón Acetilado	60-90 días	Alta	Buena
Almidón Reticulado (STMP/Ácido Cítrico)	90-120 días	Muy Alta	Moderada
Almidón Oxidado	30-50 días	Media	Alta

Impacto de la modificación en la velocidad de degradación

La modificación de los bioplásticos de almidón puede tener un impacto significativo en su rapidez de degradación en diversos ambientes, tales como tierra, agua y compostaje. Un estudio reciente determinó que el uso de glicerol como plastificante en películas de almidón de maíz modificadas por acetilación afecta significativamente sus propiedades físicas, como la solubilidad y la humedad, lo que puede tener implicaciones en su tasa de biodegradación (Cedeño et al., 2023).

Un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Copenhague demostró que al combinar almidón de cebada con residuos de la industria azucarera se puede crear un bioplástico que se degrada completamente en la naturaleza en unos dos meses; este material no solo es biodegradable, sino que también es más resistente y soporta mejor la humedad en comparación con otros bioplásticos (Blennow, 2024).

La biodegradabilidad de los bioplásticos depende de su composición y del entorno donde se descomponen; factores como temperatura, humedad, microorganismos y propiedades del material afectan su velocidad de degradación (Picho et al., 2024). Por eso, es importante evaluar tanto el material como las condiciones ambientales.

CONCLUSIONES

Esta revisión sobre los bioplásticos de almidón modificado revela que los métodos de modificación química, física y enzimática han potenciado significativamente sus características mecánicas, térmicas y su habilidad para biodegradarse en diversos ambientes. Sin embargo, aún persisten retos vinculados con el incremento de la resistencia mecánica y la longevidad, particularmente en usos industriales. La incorporación de compuestos de refuerzo, tales como la nanocelulosa y derivados agroindustriales, ha potenciado la resistencia a la tracción y la elasticidad de los bioplásticos, optimizando sus características mecánicas y funcionales. Estos progresos presentan nuevas oportunidades para la utilización de bioplásticos de almidón modificado en usos sustentables, en particular en el sector del empaquetado. No obstante, es necesario realizar más estudios para perfeccionar las formulaciones y los procedimientos de modificación, además de investigar opciones más rentables y eficaces.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abe, M. M., Martins, J. R., Sanvezzo, P. B., Macedo, J. V., Branciforti, M. C., Halley, P., Botaro, V. R., & Brienzo, M. (2021). Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. *Polymers*, *13*(15), 2484. https://doi.org/10.3390/polym13152484

Adewale, P., Yancheshmeh, M. S., & Lam, E. (2022). Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. *Carbohydrate Polymers*, *291*, 119590. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590

Ahimbisibwe, M., Banadda, N., Seay, J., Nabuuma, B., Atwijukire, E., Wembabazi, E., & Nuwamanya, E. (2019). Influence of Weather and Purity of Plasticizer on Degradation of Cassava Starch Bioplastics in Natural Environmental Conditions. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, *08*(04), 237–250. https://doi.org/10.4236/jacen.2019.84018

Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H. P., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Dassanayake, R. S., Rajapaksha, S. M., Manamperi, A., Fernando, C. A. N., Kulatunga, A. K., & Manipura, A. (2021). Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review. *Molecules*, *26*(22), 6880. https://doi.org/10.3390/molecules26226880

Cardozo Becerra, J. R., & Puerto Torres, R. L. (2019). *Agregado de valor a frutos silvestres de agraz a través de la aplicación de recubrimientos comestibles a base de almidones de papas andinas.*

Carmona-García, R., Bello-Pérez, L. A., Aguirre-Cruz, A., Aparicio-Saguilán, A., Hernández-Torres, J., & Alvarez-Ramirez, J. (2016). Effect of ultrasonic treatment on the morphological, physicochemical, functional, and rheological properties of starches with different granule size. *Starch - Stärke*, *68*(9–10), 972–979. https://doi.org/10.1002/star.201600019

Das, R., & Kayastha, A. M. (2023). An Overview on Starch Processing and Key Enzymes. In *Industrial Starch Debranching Enzymes* (pp. 1–20). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7026-9_1

Dilshad, E., Waheed, H., Ali, U., Amin, A., & Ahmed, I. (2021). General Structure and Classification of Bioplastics and Biodegradable Plastics. In *Bioplastics for Sustainable Development* (pp. 61–82). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9_2

Egharevba, H. (2019). *Propiedades químicas del almidón y su aplicación en la industria alimentaria. Propiedades químicas del almidón , 9* .

Gałkowska, D., Kapuśniak, K., & Juszczak, L. (2023). Chemically Modified Starches as Food Additives. *Molecules*, *28*(22), 7543. https://doi.org/10.3390/molecules28227543

Garcia, M. A. V. T., Garcia, C. F., & Faraco, A. A. G. (2020). Pharmaceutical and Biomedical Applications of Native and Modified Starch: A Review. *Starch - Stärke*, *72*(7–8). https://doi.org/10.1002/star.201900270

García-Guzmán, L., Cabrera-Barjas, G., Soria-Hernández, C. G., Castaño, J., Guadarrama-Lezama, A. Y., & Rodríguez Llamazares, S. (2022). Progress in Starch-Based Materials for Food Packaging Applications. *Polysaccharides*, *3*(1), 136–177. https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010007

Gerezgiher, A. G., & Szabó, T. (2022). Crosslinking of Starch Using Citric Acid. *Journal of Physics: Conference Series*, *2315*(1), 012036. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2315/1/012036

Gill, A. N., Iftikhar, A., Rashid, A., Amin, M., Khan, R. R. M., Rafique, H. M., Jelani, S., & Adnan, A. (2018). Lipase-catalyzed green synthesis of starch–maleate monoesters and its characterization. *Journal of the Iranian Chemical Society*, *15*(9), 1939–1945. https://doi.org/10.1007/s13738-018-1391-2

Goswami, B., & Mahanta, D. (2021). Starch and its Derivatives: Properties and Applications. In *Polysaccharides* (pp. 253–281). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119711414.ch12

Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., Mehmood, S., Bilal-Ul-Amin, Ullah, R. S., Khan, A., & Nazir, A. (2019). Advances in chemical modifications of starches and their applications. *Carbohydrate Research*, *476*, 12–35. https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007

Hong, Y., Liu, G., & Gu, Z. (2016). Recent advances of starch-based excipients used in extended-release tablets: a review. *Drug Delivery*, *23*(1), 12–20. https://doi.org/10.3109/10717544.2014.913324

Hossain, Md. T., Shahid, Md. A., Akter, S., Ferdous, J., Afroz, K., Refat, K. R. I., Faruk, O., Jamal, M. S. I., Uddin, M. N., & Samad, Md. A. Bin. (2024). Cellulose and starch-based bioplastics: a review of advances and challenges for sustainability. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, *63*(10), 1329–1349. https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2329980

Hu, A., Li, Y., & Zheng, J. (2019). Dual-frequency ultrasonic effect on the structure and properties of starch with different size. *LWT*, *106*, 254–262. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.040

Ibrahim, N. I., Shahar, F. S., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., & Mat Yazik, M. H. (2021). Overview of Bioplastic Introduction and Its Applications in Product Packaging. *Coatings*, *11*(11), 1423. https://doi.org/10.3390/coatings11111423

Jayarathna, S., Andersson, M., & Andersson, R. (2022a). Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications. *Polymers*, *14*(21), 4557. https://doi.org/10.3390/polym14214557

Jayarathna, S., Andersson, M., & Andersson, R. (2022b). Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications. *Polymers*, *14*(21), 4557. https://doi.org/10.3390/polym14214557

Le Loan, T. K., Thuy, N. M., Le Tri, Q., & Sunghoon, P. (2021). Characterization of gluten-free rice bread prepared using a combination of potato tuber and ramie leaf enzymes. *Food Science and Biotechnology*, *30*(4), 521–529. https://doi.org/10.1007/s10068-021-00891-2

Montoya, D., Barbosa, L. O., Méndez, J., & Murillo, W. (2020). Morphological, Structural, and Functional Evaluation of Rice Starch Acylated in a System Catalyzed by the B-Lipase of *Candida antarctica*. *Starch - Stärke*, *72*(11–12). https://doi.org/10.1002/star.202000010

Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *20*(1), 379–395. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4

Navarrete, C., Mezones, J., Ponce, W., Brito, B., Viera, W., Córdova, R., & Riera, M. (2023). Obtención y caracterización de bioplásticos a partir de almidón acetilado de semillas de aguacate. *Avances En Química*, *18*(1), 29–38. https://doi.org/10.53766/AVANQUIM/2023.18.01.03

Panrong, T., Karbowiak, T., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Effects of acetylated and octenyl-succinated starch on properties and release of green tea compounded starch/LLDPE blend films. *Journal of Food Engineering*, *284*, 110057. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110057

Park, S. H., Na, Y., Kim, J., Kang, S. D., & Park, K.-H. (2017). Properties and applications of starch modifying enzymes for use in the baking industry. *Food Science and Biotechnology*. https://doi.org/10.1007/s10068-017-0261-5

Pooja N., Shashank S., Singh, B. N., & Mazumder, N. (2024). Advancing sustainable bioplastics: chemical and physical modification of starch films for enhanced thermal and barrier properties. *RSC Advances*, *14*(33), 23943–23951. https://doi.org/10.1039/D4RA04263H

Rosicka-Kaczmarek, J., Kwaśniewska-Karolak, I., Nebesny, E., & Komisarczyk, A. (2018). The Functionality of Wheat Starch. In *Starch in Food* (pp. 325–352). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00008-1

Singh, A. K., Kumar, A., Gaikwad, K. K., & Lee, Y. S. (2023). Enzymatic Modification of Starch. In *Starch: Advances in Modifications, Technologies and Applications* (pp. 409–430). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35843-2_17

Tan, L., & Kong, L. (2020). Starch-guest inclusion complexes: Formation, structure, and enzymatic digestion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *60*(5), 780–790. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1550739

Tan, S. X., Andriyana, A., Ong, H. C., Lim, S., Pang, Y. L., & Ngoh, G. C. (2022). A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers and Plasticizers towards Sustainable Starch-Based Bioplastic Fabrication. *Polymers*, *14*(4), 664. https://doi.org/10.3390/polym14040664

Ulyarti, U., Lisani, L., Surhaini, S., Lumbanraja, P., Satrio, B., Supriyadi, S., & Nazarudin, N. (2022). The application of gelatinisation techniques in modification of cassava and yam starches using

precipitation method. *Journal of Food Science and Technology*, *59*(3), 1230–1238. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05134-0

Varghese, S., Awana, M., Mondal, D., Rubiya, M. H., Melethil, K., Singh, A., Krishnan, V., & Thomas, B. (2022). Amylose–Amylopectin Ratio. In *Handbook of Biopolymers* (pp. 1–30). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6603-2_48-1

Viana, E. B. M., Oliveira, N. L., Ribeiro, J. S., Almeida, M. F., Souza, C. C. E., Resende, J. V., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2022). Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (Musa paradisiaca L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). *Food Packaging and Shelf Life*, *31*, 100776. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776

Wang, S., Wang, J., Liu, Y., & Liu, X. (2020). Starch Modification and Application. In *Starch Structure, Functionality and Application in Foods* (pp. 131–149). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0622-2_8

Wang, Z., Mhaske, P., Farahnaky, A., Kasapis, S., & Majzoobi, M. (2022). Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review. *Food Hydrocolloids*, *129*, 107542. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107542

Wilpiszewska, K., Antosik, A. K., & Zdanowicz, M. (2019). The Effect of Citric Acid on Physicochemical Properties of Hydrophilic Carboxymethyl Starch-Based Films. *Journal of Polymers and the Environment*, *27*(6), 1379–1387. https://doi.org/10.1007/s10924-019-01436-9

Zaborowska, M., Bernat, K., Pszczółkowski, B., Cydzik-Kwiatkowska, A., Kulikowska, D., & Wojnowska-Baryła, I. (2024). Timeframe of aerobic biodegradation of bioplastics differs under standard conditions and conditions simulating technological composting with biowaste. *Journal of Environmental Management*, *369*, 122399. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122399

Zarski, A., Bajer, K., & Kapuśniak, J. (2021). Review of the Most Important Methods of Improving the Processing Properties of Starch toward Non-Food Applications. *Polymers*, *13*(5), 832. https://doi.org/10.3390/polym13050832