

Aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos: una revisión bibliográfica

Natalia Ximena Ochoa Porras

Asesor

Ginna Alejandra Ordoñez Narvaez

Ingeniera Agroindustrial. MSc. Y PhD. Ciencias Agrarias

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Programa Ingeniería de Alimentos

2026

Nota de Aceptación

Esta página opcional

Nombre Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

A Dios por ser la luz de mi vida y por cumplir sus promesas.

A mis padres, por su esfuerzo, comprensión y confianza. Su amor incondicional, presencia constante y palabras de aliento han sido guía y apoyo en cada paso de mi vida.

A mi hermano, cuya alegría e ingenua confianza en mí me impulsan a ser mejor cada día.

A mi familia, especialmente a mis abuelos y tíos, cuya generosidad y apoyo reflejan el poder del amor familiar.

A Liliana Vélez, por su apoyo y cariño sincero, que han sido invaluable.

A todas las mujeres que lucharon por nuestro derecho a la educación; su valentía hizo posible mi camino universitario y este título profesional.

Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Agradecimientos

A Dios, por bendecirme con sabiduría, inteligencia y valentía.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi directora de trabajo de grado, la PhD. Ginna Ordoñez, por su orientación, exigencia y acompañamiento en el desarrollo del presente trabajo investigativo. Su guía fue fundamental para alcanzar este logro.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, por su compromiso con la excelencia y promover la educación sin barreras, brindándome las herramientas necesarias para mi formación profesional.

A mis docentes, quienes con su dedicación compartieron no solo sus conocimientos técnicos, sino también su pasión por la ingeniería, la ciencia y la academia.

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar, a partir de la literatura científica, el potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado, con el fin de mitigar el impacto ambiental asociado a la inadecuada gestión de residuos agroindustriales y promover la innovación en el envasado sostenible de alimentos. Para ello, se desarrolló una revisión bibliográfica con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-analítico, basada en la recopilación de información secundaria obtenida en bases de datos académicas, aplicando criterios de selección rigurosos. Los resultados evidencian que la cascarilla de arroz contiene entre 35–40% de celulosa, 20–25% de lignina, alrededor de 1,8% de almidón y compuestos antioxidantes. La celulosa destaca como el componente estructural más utilizado, tanto en forma de fibra como en derivados (carboximetilcelulosa-CMC y nanocelulosa), incorporados como refuerzo en matrices poliméricas para la obtención de materiales de origen biológico. Aunque estas matrices presentan limitaciones mecánicas frente a plásticos rígidos convencionales, las biopelículas evaluadas exhiben una excelente barrera al oxígeno y propiedades bioactivas, especialmente antioxidantes. Asimismo, las pruebas de vida útil reportadas confirman su viabilidad funcional y su capacidad para inhibir la proliferación microbiana, mostrando un desempeño comparable al de envases plásticos convencionales, con la ventaja de su biodegradabilidad final. La evaluación tecnológica evidencia que la cascarilla de arroz tiene alto potencial de aprovechamiento en la elaboración de biopelículas para aplicaciones en el envasado de alimentos.

Palabras clave: Cascarilla de arroz, Biopelículas, Envasado de alimentos, Gestión de residuos agroindustriales, Aprovechamiento de subproductos.

Abstract

This study aims to evaluate, based on scientific literature, the potential use of rice hulls as a raw material for the development of biopolymer films and other food packaging materials, with the purpose of mitigating the environmental impact associated with the inadequate management of agro-industrial waste and promote innovation in sustainable food packaging. To achieve this objective, a qualitative bibliographic review with a descriptive-analytical scope was conducted scope was conducted, based on the compilation of secondary data from academic databases, applying rigorous selection criteria. The findings indicate that rice husk contains 35–40% cellulose, 20–25% lignin, approximately 1.8% starch, and antioxidant compounds. Cellulose stands out as the most widely used structural component, both in fiber form and in derivatives (carboxymethyl-CMC and nanocellulose), incorporated as reinforcement in polymer matrices to produce biobased materials. Although these matrices exhibit mechanical limitations compared to conventional rigid plastics, the evaluated biofilms demonstrate an excellent oxygen barrier property and bioactive, especially antioxidants. Furthermore, shelf-life studies reported in the literature confirm their functional viability and their ability to inhibit microbial growth, showing performance comparable to conventional plastic packaging, with the additional advantage of their eventual biodegradability. The technological evaluation demonstrates that rice husk has high potential for use in the production of biofilms for food packaging applications.

Keywords: Rice hulls, Biofilms, Food packaging, Agro-industrial waste management, Utilization of by-products.

Tabla de Contenido

Introducción	13
Justificación	16
Planteamiento del problema	17
Pregunta de investigación.....	19
Objetivos.....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos.....	20
Marco conceptual y teórico.....	21
Antecedentes de la investigación.....	21
Fundamentos para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz: valorización de subproductos, marco normativo y su impacto en la economía circular y sostenibilidad.....	23
Valorización de residuos agroindustriales: una oportunidad para la economía circular y la sostenibilidad	24
Aplicación de bioplásticos en la industria alimentaria: oportunidades y limitaciones	25
Marco legal colombiano e internacional.....	25
Marco conceptual	26
Metodología	32
Tipo de investigación.....	32
Bases de datos.....	32
Estrategia de búsqueda	33
Criterios de selección.....	35
Criterios de inclusión.....	35

Criterios de exclusión	35
Gestor de referencias	36
Capítulo 1. Composición química y estructural de la cascarilla de arroz y características bioactivas de interés reportadas en la literatura para la elaboración de biomateriales	37
Características químicas	37
Características estructurales	39
Características bioactivas de interés	42
Capítulo 2. Aplicaciones de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos	45
Obtención de biopelículas a partir de la cascarilla de arroz	46
Métodos de extracción y aislamiento de biopolímeros y compuestos bioactivos para la síntesis de películas.....	47
Aplicaciones de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas	50
Uso de la cascarilla de arroz para envasado para alimentos.....	55
Capítulo 3. Propiedades tecnológicas de las biopelículas elaboradas con cascarilla de arroz para el envasado de alimentos	59
Propiedades mecánicas	60
Propiedades de barrera.....	64
Propiedades ópticas	68
Aplicación del material en el envasado de alimentos.....	70
Biodegradabilidad en suelo	74
Comparación del potencial de la cascarilla de arroz frente a otros residuos agroindustriales en aplicaciones de envasado.....	76

Conclusiones	82
Recomendaciones	84
Referencias bibliográficas.....	85

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología	36
Figura 2 Estructura del grano de arroz paddy	37
Figura 3 Estructura de la biomasa lignocelulósica	40
Figura 4 Esquema de fases para la obtención de biopelículas	47
Figura 5. Bandejas biodegradables de cascarilla de arroz.	57
Figura 6 Transparencia en películas de alcohol polivinílico con celulosa y nanocelulosa.....	69
Figura 7 Empacado de uvas almacenadas al ambiente día 18	71
Figura 8 Empacado de uvas almacenadas al ambiente día 20	71
Figura 9 Empacado de uvas almacenadas en refrigeración día 24	72
Figura 10 Empacado de uvas almacenadas en refrigeración día 28	72
Figura 11 Comparación del crecimiento microbiano en fresas en envase abierto, de ldpe y de biocompuesto RHF/BKC/CS.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1 Palabras clave y términos posibles	33
Tabla 2 Ecuaciones de búsqueda	34
Tabla 3 Composición proximal cascarilla de arroz.....	38
Tabla 4 Composición química y estructural de la cascarilla de arroz.....	38
Tabla 5 Aplicaciones de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas comestibles....	51
Tabla 6 Propiedades mecánicas en las biopelículas usando la cascarilla de arroz como materia prima	61
Tabla 7 Propiedades de barrera de las biopelículas usando la cascarilla de arroz como materia prima	65
Tabla 8 Comparación del contenido de celulosa de diferentes residuos agroindustriales.	77
Tabla 9 Rendimiento en la obtención de CMC a partir de diferentes residuos agroindustriales.	78

Lista de Apéndices

Apéndice A Tablas complementarias y factores de conversión	99
--	----

Introducción

La presente investigación aborda el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, específicamente de la cascarilla de arroz, como materia prima para la elaboración de biopelículas y materiales de envase para la industria alimentaria. Anteriormente, el concepto de empaque solamente se asociaba con la protección del producto, en el último siglo, el concepto ha evolucionado hacia el término Packaging, que involucra la conservación del producto con el diseño, la selección de materiales sostenibles y estrategias de marketing (Ospina Arias, 2013). Si bien los envases de origen fósil son los más utilizados por la industria de alimentos debido a su versatilidad y bajo costo, su uso ha generado impactos ambientales negativos, por lo que desde principios del siglo XXI se ha impulsado su transición hacia alternativas renovables (Robertson, 2013).

A nivel global, se estima que el 46% de los desechos sólidos corresponden a residuos agroindustriales gestionados de manera inadecuada (Ortega & Quispe, 2021). En Latinoamérica, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Ecuador (2019) solo se aprovecha el 35%, mientras que el excedente se incinera o vierte en fuentes hídricas. En Colombia, el arroz es uno de los alimentos más producidos y consumidos, según la Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM), para el segundo semestre de 2025 el departamento del Meta representó el 13,9% de la producción nacional de arroz paddy, con una producción de 311.179 toneladas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] et al., 2025, p. 13). Considerando que la cascarilla representa el 20% del peso del arroz paddy, el departamento generó aproximadamente 62.235 t de cáscara de arroz solamente en dicho semestre; desafortunadamente, al igual que en otros países, la cascarilla es quemada para reducir su

volumen, provocando contaminación atmosférica y ambiental en municipios como El Dorado (Castro et al., 2020).

Ante esta problemática, esta investigación se enmarca en un estudio de tipo documental con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-analítico, bajo un diseño no experimental. La metodología se fundamenta en la técnica de recolección de información secundaria en bases de datos de académicas como ScienceDirect, Scielo, Scopus y Google Académico. Siguiendo los lineamientos de Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), se aplicaron criterios de inclusión y exclusión rigurosos para la organización y el análisis crítico de la literatura científica, garantizando la validez técnica de la información recopilada.

El propósito central del trabajo es evaluar, a partir de la literatura científica, el potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos. Esta monografía no solo permite evidenciar los estudios relacionados con el uso de esta materia prima como alternativa para mitigar la contaminación por la inadecuada gestión residuos agroindustriales (Ramírez, 2023); sino que también destaca investigadores que buscan promover la innovación tecnológica, fomentando el desarrollo de biomateriales capaces proteger y mejorar la calidad de los alimentos envasados (Han, 2013). Asimismo, busca evidenciar aquellos documentos donde el uso de la cascarilla de arroz es una estrategia clave para la implementación de principios de economía circular y de sostenibilidad en el sector (Belda, 2018; Romero-Sáenz, 2022). El desarrollo de la investigación consolida un documento esencial que se integra a las investigaciones sobre el aprovechamiento de subproductos como la cascarilla de arroz.

En el capítulo I se revisa la composición químico-estructural de la cascarilla de arroz, destacando su matriz lignocelulósica y contenido de sílice (Gao et al., 2018), así como azúcares

fermentables y compuestos fenólicos (Montenegro, 2020; Piñeros y Sierra, 2018) con potencial estructural, funcional y bioactivo. En el capítulo II se analizan las aplicaciones de la literatura científica sobre el uso de la cáscara de arroz para la síntesis de bioplásticos como el polihidroxialcanoato (PHA) (Montenegro, 2020) y desarrollo de películas y envases de origen biológico basados en almidón termoplástico (TPS) reforzados con fibras de celulosa (Collazo-Bigliardi et al., 2018; Srivastava et al., 2023) o derivados como carboximetilcelulosa y nanocelulosa (Cholant et al., 2025; Gupta et al., 2019; Kargarzadeh et al., 2017), indicando las etapas de pretratamiento, tratamiento y procesamiento. Finalmente, el Capítulo III presenta una evaluación tecnológica comparativa de las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, elongación, módulo de elasticidad), de barrera (permeabilidad a gases y vapor de agua) y de degradabilidad de estos materiales frente a los plásticos convencionales (Ashby et al., 2007; Callister y Rethwisch, 2018; Robertson, 2013). A través de esta evaluación, se determina el potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz para la generación de envases sostenibles.

Justificación

A nivel teórico, aunque el aprovechamiento de la cascarilla de arroz ha sido estudiado por diversos autores, no se encontraron investigaciones enfocadas en municipios del departamento Meta, lo que genera vacíos en el conocimiento; en este sentido, este trabajo aporta al contexto del sector. La revisión bibliográfica evidencia estudios orientados al uso de la cascarilla en la elaboración de biopelículas y envases para alimentos (Guamán, 2022; Gupta et al., 2019; Montenegro, 2020; Piñeros y Sierra, 2018); sin embargo, dichos trabajos no consideran como problema de estudio la contaminación derivada de los residuos agroindustriales.

A nivel práctico, una de las razones que motivó el desarrollo de este trabajo es visibilizar la problemática ambiental generada por la inadecuada gestión de residuos como la cascarilla de arroz (Castro et al., 2020). Además, identifica su potencial de aprovechamiento como alternativa para la elaboración de biopelículas y bioempaques que pueden ser usados por la misma agroindustria.

A nivel social, este trabajo pretende ayudar a mejorar la calidad de vida de los habitantes del sector, ya que implementar proyectos que aprovechen los subproductos del arroz, contribuirá a la reducción de residuos y la mitigación de los efectos ambientales descritos por Castro et al. (2020).

El desarrollo de esta investigación contribuye a la generación de conocimiento, consolidando un documento esencial que se integra a las investigaciones existentes sobre el potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz, ayudando a otros profesionales a profundizar en el tema de estudio, con el fin de ser base para la implementación de nuevos proyectos en el sector.

La elección del tema de estudio responde a la necesidad de fortalecer las investigaciones en el campo de la Ingeniería de Alimentos para enfrentar los retos actuales de la industria, como la gestión de residuos y la sostenibilidad (Ramírez, 2023). Promueve la aplicación de métodos emergentes de conservación en alimentos, como los recubrimientos comestibles (Han, 2013), y fomenta el desarrollo de propuestas innovadoras que utilizan subproductos agrícolas para la obtención de biopelículas y materiales de envase renovables usados en la industria alimentaria. Asimismo, el estudio contribuye al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 12 (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015), relacionado con la producción y el consumo responsable, ya que el aprovechamiento de subproductos como la cascarilla de arroz es una estrategia clave para la implementación de principios de economía circular y de sostenibilidad en el sector. La investigación realizada contribuye al fortalecimiento de habilidades que aportan al perfil del profesional en Ingeniería de Alimentos.

Esta investigación es viable, ya que se fundamenta en una revisión bibliográfica y se dispone de los recursos necesarios para el desarrollo, como el acceso a bases de datos científicas, a las cuales se accede mediante la biblioteca de la universidad; recursos tecnológicos como computador con conexión a internet y el gestor de referencias Mendeley en su versión gratuita. Finalmente, el recurso humano está representado por el estudiante, quien asume el rol de investigador responsable de la búsqueda, análisis y síntesis de la información.

Planteamiento del problema

La industria alimentaria es uno de los sectores con mayor avance y crecimiento, sin embargo, paralelamente a este desarrollo, crecen problemáticas ambientales asociadas al modelo de economía lineal de “extraer, fabricar, consumir y desechar” que incrementa la generación de residuos (Ayala et al., 2021; Ramírez, 2023; Romero-Sáenz, 2022). Se estima que el 46% de los

residuos generados a nivel mundial provienen de la agroindustria, que abarca actividades de cultivo hasta los procesos de transformación de la materia prima; esta cifra evidencia el impacto de la gestión inadecuada de estos residuos (Ortega & Quispe, 2021).

En el panorama latinoamericano, la investigación de Riera et al. (2018) estima que Ecuador produce cerca de 2200 millones de kilogramos de residuos agroindustriales, de hecho, solamente en el tercer trimestre de 2019 este país generó 366.418.500 kg de cascarilla (MAGP, 2019). El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Ecuador establece que solo el 35% de este residuo es utilizado en otras industrias, mientras que la cascarilla sobrante es quemada o vertida en ríos. En Colombia, contexto en el cual se desarrolla esta monografía, se generan alrededor de 71.943.813 t/año de residuos agroindustriales, mucho más que en Ecuador. Desafortunadamente, a menudo son incinerados o llevados a rellenos sanitarios, generando contaminación por la mala disposición de estos residuos (Ayala et al., 2021; Peñaranda et al., 2017).

El departamento Meta se caracteriza por su vocación agrícola, donde la producción de arroz es una de las actividades más relevantes. Esta actividad genera grandes volúmenes de cascarilla como resultado inevitable, pues está vinculado al cultivo y transformación del grano. La poscosecha de arroz implica etapas de limpieza, secado y descascarillado, la cascarilla constituye aproximadamente el 20% del peso del arroz, siendo esta última etapa la principal generadora de residuos (Ramírez et al., 2024). La gestión inadecuada de este residuo, que tradicionalmente se incinera para reducir su volumen, genera problemas ambientales por las altas emisiones de CO₂ y las partículas obtenidas de la quema incontrolada (Nuncira-Negrete, 2023; Romero-Sáenz, 2022). En el municipio de El Dorado, Meta se ha evidenciado que la disposición

inadecuada de los residuos agrícolas provenientes de palmeras y arroceras, ocasionan la contaminación del suelo, fuentes hídricas y la atmósfera (Castro et al., 2020).

La cascarilla de arroz posee una composición orgánica valiosa, rica en celulosa, hemicelulosa, lignina y sílice (Gao et al., 2018), componentes que le confieren propiedades de interés para aplicaciones industriales. A pesar del potencial de la cascarilla de arroz, existe una brecha en la consolidación de información técnica que permita evaluar su viabilidad como material para envases en contacto directo con alimentos.

Ante esta problemática y considerando esta brecha de conocimiento, se hace necesario investigar alternativas de aprovechamiento que mitiguen su impacto ambiental y promuevan la implementación de principios de economía circular y sostenibilidad en las industrias agroalimentarias. Esta revisión bibliográfica busca evaluar el potencial de aprovechamiento de este residuo agroindustrial, recopilando, sintetizando, organizando y analizando información relacionada con su uso en la elaboración de biopelículas y materiales para envases destinados al contacto con alimentos, bajo criterios de inocuidad y funcionalidad.

Pregunta de investigación

Considerando la problemática descrita y los argumentos expuestos anteriormente, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz, reportado en la literatura científica, como materia prima para la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos?

Objetivos

Objetivo general

Identificar a partir de la literatura científica, el potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos.

Objetivos específicos

Revisar la composición química y estructural de la cascarilla de arroz teniendo en cuenta sus características bioactivas de interés reportadas en la literatura para la elaboración de biomateriales.

Identificar las aplicaciones reportadas en la literatura sobre el uso de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos.

Reconocer a partir de la literatura científica, las propiedades tecnológicas de biopelículas elaboradas con cascarilla de arroz para el envasado de alimentos.

Marco conceptual y teórico

Antecedentes de la investigación

Desde los años noventa se han desarrollado investigaciones en Europa y Asia para aprovechar la cascarilla de arroz en aplicaciones industriales, destacándose el caso de la empresa italiana Novamont SpA, que patentó en Estados Unidos polímeros biodegradables obtenidos de almidón de maíz, trigo y arroz mediante extrusión (Navia Porras, 2015). En España, Montenegro (2020) presenta una revisión bibliográfica sobre la producción de bioplásticos como el polihidroxicanoato a partir de la cascarilla de arroz, siendo una alternativa al plástico tradicional. La investigación de Ferrer (2018) analiza el efecto de incorporar fibras de celulosa extraídas de la cascarilla de arroz y café, en películas alimentarias a base de almidón de maíz, encontrando que las fibras reforzaron y mejoraron las propiedades del film.

En Ecuador, Conza (2020) estudia la obtención de biopelículas a partir de residuos agroindustriales como la cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, semilla de mango, cáscara de papa y plátano, encontrando que su alto contenido en almidón y celulosa valida su potencial como materia prima para la creación de bioplásticos. En este mismo país, Guamán (2022) logró obtener biopelículas a partir de almidón de triticale y cascarilla de arroz aplicados al empaque de alimentos. Por otro lado, en República Dominicana la investigación de Franco et al. (2023) determina las propiedades físicas de un bioplástico elaborado con cascarilla de arroz y de yuca, concluyendo que es apto para algunas aplicaciones industriales, aunque no especifica su uso para la industria de alimentos. En Perú, Vega (2022) desarrolló platos biodegradables a partir de cascarilla de arroz y bagazo de caña, consolidando el potencial del residuo para la sustitución de polímeros fósiles.

En Colombia, se encuentra relevante la investigación de Piñeros y Sierra (2018), quienes evaluaron el efecto de la adición de extractos antioxidantes de cascarilla de arroz en películas a base de almidón termoplástico y PCL, obteniendo mejoras en la actividad antioxidante, las propiedades de barrera y las funcionales. Por otra parte, Tenorio y Martínez (2019) elaboraron un material compuesto por cascarilla de arroz y harina de yuca como alternativa a los envases de poliestireno expandido. En Yopal (Casanare) desarrollaron envases biodegradables a partir de la cascarilla de arroz, con el objetivo de sustituir platos y vasos plásticos de un solo uso (Umbarila Gil et al., 2024). Estos antecedentes evidencian el potencial de este subproducto agroindustrial en la fabricación de biomateriales alternativos al plástico convencional, reforzando la pertinencia de explorar su aplicación en el empaquetado de alimentos.

Si bien esta monografía está enfocada al uso de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas y bioempaques alimentarios, la revisión bibliográfica indica que este subproducto ha sido estudiado en otros sectores (Díaz, 2019), como el de la construcción, donde se emplea para mejorar las propiedades mecánicas del cemento debido al alto contenido de dióxido de silicio obtenido de la cascarilla de arroz (Mafla, 2009) y para la fabricación de morteros de mampostería (Pérez, 2010); o el energético, destacando su potencial como fuente renovable en procesos de cogeneración y alternativas de energía sostenible. Estos trabajos coinciden en que el volumen de este residuo es un problema que debe ser atendido y resaltan la importancia de aprovechar las propiedades orgánicas de la cascarilla de arroz (Nuncira-Negrete, 2023; Ortega & Quispe, 2021; Ramírez et al., 2024).

A nivel departamental, se identifica una brecha investigativa en el aprovechamiento de la cascarilla de arroz. Al respecto, Valencia et al. (2025) analizaron la pertinencia de utilizar este subproducto en Villavicencio (Meta) para sustituir plásticos de un solo uso y poliestireno

expandido; si bien este artículo se limita a una revisión del marco regulatorio y teórico, concluye que la propuesta es legalmente viable y significativa para mitigar la contaminación ambiental.

Ante la limitada evidencia experimental en el área de empaques en el departamento, se destacan aplicaciones en otros sectores que demuestran la viabilidad técnica del aprovechamiento de este subproducto. Tal es el caso de Bernal et al. (2018), quienes en esta misma ciudad utilizaron la cascarilla de arroz, aprovechando sus propiedades estructurales, como alternativa sostenible al asbesto en el diseño de mezcla y dosificación para fabricar tejas de construcción. Por otro lado, Osorio Aguirre (2019) realizó un análisis técnico-económico determinando que el uso de la cascarilla favorece la generación de energía eléctrica mediante procesos de gasificación.

Estos hallazgos evidencian el potencial de valorización de la cascarilla de arroz en el Meta para la construcción y la energía, pero expone una brecha de investigación en el desarrollo de biomateriales para el envasado de alimentos. La presente monografía identifica este vacío y, a partir del análisis de la literatura, sustenta la importancia de investigar en esta área, con el propósito de aportar bases teóricas que orienten futuras investigaciones.

Fundamentos para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz: valorización de subproductos, marco normativo y su impacto en la economía circular y sostenibilidad

La cascarilla es la capa más externa del grano de arroz, representa un desecho agroindustrial que se produce a grandes volúmenes en los lugares donde se siembra y procesa arroz. Tradicionalmente se desecha en terrenos o se incinera, generando contaminación (Ayala et al., 2021); también se suele aprovechar como cama para el ganado y aves, abono orgánico, combustible por su poder calorífico y como sustrato en la elaboración de bioplásticos (Guamán, 2022; Montenegro, 2020).

Existen diferentes tecnologías para la obtención de compuestos de la cascarilla de arroz utilizados para sintetizar bioplásticos, los pretratamientos ácidos se llevan a cabo con ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o nítrico; y el tratamiento alcalino utiliza hidróxido de sodio, de calcio o de amonio (Torres et al., 2017). La extracción de fibras de celulosa de la cascarilla de arroz es un desafío debido a limitaciones como el bajo rendimiento, elevado contenido de sílice y la naturaleza protectora bioquímica y estructural de la lignocelulosa (Zambrano-Zambrano et al., 2021).

Valorización de residuos agroindustriales: una oportunidad para la economía circular y la sostenibilidad

Los residuos agroindustriales representan una oportunidad para fortalecer la economía circular al integrarse en las estrategias de producción sostenible, su valorización como materias primas para el desarrollo de nuevos productos, les permite ser aprovechados y reintegrados a la cadena productiva de la misma industria generadora o de otros sectores productivos. Gracias a la composición fisicoquímica, los residuos agroindustriales tienen un alto potencial de aprovechamiento, por lo que, en lugar de verse como un problema, deben verse como una oportunidad de crecimiento para la cadena productiva, las industrias y la economía circular (Romero-Sáenz, 2022).

Ayala et al. (2021) concluyen en su trabajo que la generación de proyectos sobre el aprovechamiento de residuos del cultivo de arroz, aportan con innovación a una economía circular rentable con elevada conciencia ambiental sobre la reducción de los residuos producidos por el sector agrícola, obteniendo beneficios ambientales como la mitigación al cambio climático, el efecto invernadero y la contaminación de las fuentes de agua.

Aplicación de bioplásticos en la industria alimentaria: oportunidades y limitaciones

Los plásticos son un grupo de materiales derivados del petróleo, caracterizados por su bajo costo y sus innumerables aplicaciones (Lackner et al., 2023). Como alternativa sostenible, los bioplásticos —derivados de materias primas renovables— han cobrado relevancia en diversos sectores industriales debido a su reducido impacto ambiental, naturaleza biodegradable y su contribución a los objetivos de sostenibilidad, encontrándolos interesantes para la elaboración de materiales de grado alimenticio (Boey et al., 2022).

No obstante, la producción y uso generalizado de los biopolímeros y bioplásticos, enfrentan limitaciones como la falta de disponibilidad, infraestructura limitada para la gestión de residuos, altos costos de fabricación, sensibilidad térmica, baja resistencia a procesos de fabricación prolongados, deficiencias técnicas mecánicas en comparación con los materiales de origen fósil y carencia de marco legal consistente (Jafarzadeh et al., 2025; Lackner et al., 2023).

Ante la creciente preocupación por la seguridad ambiental y sanitaria, la comunidad científica ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de envases renovables y seguros. Las películas derivadas de biopolímeros han demostrado ser matrices eficaces para desarrollar materiales de envasado funcionales al incorporar aditivos como agentes antimicrobianos, antioxidantes, nutrientes y colorantes, que mejoran la calidad y la vida útil de los alimentos. Si bien persisten las limitaciones técnicas anteriormente descritas, investigaciones recientes sugieren su mejoría mediante la innovación con sistemas de envasado activo y nanotecnología (Chawla et al., 2021).

Marco legal colombiano e internacional

El desarrollo y la aplicación de materiales de envasado destinados al contacto con alimentos están regulados por disposiciones sanitarias orientadas a garantizar la inocuidad y la

protección del consumidor. En este sentido, cualquier material o envase elaborado a partir de cascarilla de arroz debe cumplir con la normativa vigente aplicable a materiales en contacto con alimentos.

En Colombia, el artículo 266 de la Ley 9 de 1979 establece que “las superficies que estén en contacto con los alimentos o bebidas deben ser inertes a éstos, no modificar sus características organolépticas o fisicoquímicas y, además, estar libres de contaminación” y deben cumplir con la reglamentación del Ministerio de Salud. La Resolución 683 de 2012 establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales y envases que tengan contacto con alimentos. La Ley 2232 de 2022 fomenta la sustitución de los plásticos por alternativas sostenibles como materiales no plásticos reutilizables o plásticos biodegradables. Para los bioempaques y biopelículas compuestas por varios materiales, la NTC-ISO 16620 de 2022 permite cuantificar el porcentaje de material de origen biológico.

A nivel internacional, la Asociación Española de Normalización establece en la UNE-EN 13432 de 2001 las características que debe poseer un material para definirse como biodegradable o compostable. La norma ASTM D5338 de 2015 define el método estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje controlado.

Marco conceptual

Arroz: El arroz (*Oryza sativa*) es un cereal de la familia de las gramíneas preferido por su valor nutricional, disponibilidad y precio. Este producto descascarado de color blanco representa una buena fuente de energía por ser rico en carbohidratos (Dirección de Información Agraria, 2011). Según Acevedo et al. (2006) la taxonomía del arroz indica que pertenece a la División Angiospermae, Clase Monocotyledoneae, Orden Glumiflorae, Tribu Oryzeae, Familia Poaceae (gramineae), siendo la *Oryza sativa* L. una de las especies más cultivadas.

El cultivo del arroz inició hace aproximadamente 10.000 años en varias regiones de Asia y se ha convertido en el segundo cultivo más grande a nivel mundial después del trigo. Su ciclo de vida inicia con la siembra de las semillas, crecimiento, floración y la cosecha de los granos (Acevedo et al., 2006).

En Colombia, el Quinto Censo Nacional Arrocerero indica que es sembrado en zonas como Bajo Cauca, Centro, Costa Norte, Santander y los Llanos; los departamentos con las mayores áreas cosechadas fueron Casanare, Tolima y Meta (DANE et al., 2023). Según la Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM), para el segundo semestre de 2025 la producción nacional en arroz paddy verde fue de 2.231.301 t, donde el departamento Meta representa el 13,9% de esta producción, es decir, aproximadamente 311.179 t de arroz paddy (DANE et al., 2025, p. 13). La cascarilla de arroz representa el 20% del peso del arroz, por lo que, dada las cifras de producción expresadas en el ENAM, se estimaría que el departamento solamente en el segundo semestre del año 2025 generó 62.235 t de cascarilla, evidenciando que este es un residuo que se genera en grandes volúmenes.

Arroz paddy verde: producto cosechado del cultivo de arroz al que no se le ha removido la cáscara (DANE et al., 2023).

Cascarilla de arroz: Es una fibra corta que recubre naturalmente el grano de arroz, que se obtiene como subproducto del proceso de molienda (Torres, 2018). Este subproducto lignocelulósico se caracteriza por su baja degradabilidad, limitado valor nutricional y elevado contenido de dióxido de silicio, que lo hace no apto para el consumo humano (Pérez, 2010).

Materia prima: Sustancias naturales o artificiales, empleadas por la industria de alimentos para su utilización directa, fraccionamiento o conversión en alimentos para consumo humano (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013, art. 3).

Residuos: Cualquier objeto, material, sustancia o producto que es rechazado porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la normatividad vigente lo estipula como residuo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2005, art. 3).

Residuos orgánicos: “Son nutrientes no aprovechados que la naturaleza recupera de forma natural. Corresponden a una importante fracción de los residuos industriales y a más de la mitad de los residuos domiciliarios y asimilables a domiciliarios” (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, s. f).

Residuos agroindustriales: Son materiales orgánicos biodegradables obtenidos de actividades de la agroindustria. La composición química y biológica de los residuos varía según las materias primas utilizadas y el proceso de industrialización, pero generalmente se componen de biomasa lignocelulósica proveniente de elementos estructurales (como celulosa, hemicelulosa y lignina) o no estructurales (como extractivos y cenizas) (Vargas, 2020, como se citó en Universidad Nacional de Chimborazo [UNACH], 2024). Para la Directiva 2008/98/CE del parlamento europeo, los residuos agroindustriales pueden considerarse subproductos cuando es posible usarlos directamente en otros procesos productivos, sin requerir transformaciones adicionales, siempre que su uso sea seguro y no genere efectos ambientales adversos, citando de Leite et al. (2021).

Gestión de residuos: Concepto que se aplica a las labores asociadas al manejo de los desechos de una sociedad (Blanco et al., 2014).

Aprovechamiento de residuos: Se refiere al proceso de valorización de los materiales que componen los residuos, mediante la recuperación, reciclado o regeneración (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2005, art. 3). El aprovechamiento de residuos permite la

conservación de los recursos naturales, reemplaza productos que no requieren ser elaborados y reduce la generación de grandes volúmenes de desechos, beneficiando a la sociedad y el ambiente. Se lleva a cabo gracias a las tecnologías de aprovechamiento aplicadas en áreas como el compostaje, producción de bioenergéticos (biocombustibles, biogás, bioetanol), obtención de alimentos y fabricación de nuevos productos de interés, tecnología que acoge la elaboración de envases de origen biológico (UNACH, 2024).

Degradabilidad: hace referencia a la desintegración mecánica y estructural del material (Piergiovanni y Limbo, 2016; Robertson, 2013).

Biodegradable: Se refiere al proceso donde los microorganismos consumen un sustrato como fuente de alimento, convirtiéndolo en agua, dióxido de carbono o biomasa (Piergiovanni y Limbo, 2016; Robertson, 2013). Es decir, cuando los organismos vivientes descomponen con facilidad y rapidez las sustancias que se encuentran dentro de esta categoría (Ramírez, 2023).

Biopolímeros: Son macromoléculas de origen natural sintetizadas por seres vivos, que no presentan contaminación y son biodegradables, a diferencia de los polímeros sintéticos. Pueden ser utilizados como recubrimientos, envases alimenticios y nano fibras de alimentos funcionales (Aguilar et al., 2019; Lackner et al., 2023).

Bioplásticos: European bioplastics los define como un conjunto heterogéneo de nuevos materiales con diferentes propiedades y aplicaciones que deben haberse obtenido de una base biológica, deben ser compostables, biodegradables, o ambos. Se clasifican según el proceso de elaboración, sea extraídos de biomasa: basados en almidón y celulosa; y los producidos a partir de proteínas: colágeno y queratina (Han, 2013; Montenegro, 2020; UNACH, 2024). Según Lackner et al. (2023) los bioplásticos son materiales derivados de la combinación de biopolímeros y aditivos, pueden ser parcial o totalmente de origen biológico y/o degradables bajo

condiciones específicas. Representan entre el 1 y 2% de los plásticos, aunque por su potencial pueden reemplazar hasta el 90% de los plásticos de origen fósil, especialmente aquellos de corta vida útil, siendo un producto de interés en una economía circular.

Biobasados: se refiere a polímeros, materiales o envases de base biológica derivados de fuentes renovables o biomasa (Robertson, 2013).

Bioempaques: Los bioempaques son envases o embalajes a base de material biológico (Han, 2013).

Envase primario: Artículo que está en contacto directo o indirecto con el alimento, destinado a contenerlo y protegerlo de agentes externos de alteración y contaminación (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013, art. 3).

Biopelículas alimentarias: Son una matriz preformada, transparente, delgada que se produce a partir de biopolímeros comestibles y aditivos de grado alimenticio, tienen la función de proteger el alimento y mejorar su calidad (Han, 2013). Estos materiales pueden ser activos, por lo que además de ampliar el tiempo de vida útil, mantienen o mejoran el estado de los alimentos envasados al transmitir componentes al alimento (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012, art. 3).

Inocuidad del envase: Garantiza que los materiales que entran en contacto con el alimento no causarán modificaciones indeseables en las características nutricionales y sensoriales de los alimentos, ni contaminará con sustancias que representen riesgo para el consumidor (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012, art. 3).

Vida útil: Periodo de tiempo en el cual el alimento conserva de manera aceptable sus características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales, el cual, siguiendo unas condiciones controladas de almacenamiento permanece inocuo. Puede verse afectada por el tipo de alimento,

la formulación del producto, las condiciones sanitarias desde el proceso hasta la distribución y las prácticas de los consumidores (Carrillo y Reyes, 2014).

Economía circular: Modelo productivo/económico que favorece el aprovechamiento de recursos, reemplazando el modelo de economía lineal de fabricar, usar y desechar. Este modelo se basa en el ciclo biológico de la naturaleza, pretendiendo que los productos se mantengan vigentes en la economía, ya sea extendiendo su vida útil o generando nuevos productos a partir de estos (Belda, 2018).

Sostenibilidad: Se refiere a la gestión eficiente de los recursos naturales (Belda, 2018).

Metodología

Tipo de investigación

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo documental, con enfoque cualitativo y alcance descriptivo–analítico, orientado a la revisión y análisis de información científica relacionada con el aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima para la producción de bioempaques y biopelículas alimentarias. El diseño no es experimental, dado que no se realizaron pruebas de laboratorio ni se manipularon variables, sino que se fundamenta en la técnica de recolección de datos secundarios, enfocada en la recopilación, organización y análisis crítico de la literatura científica existente (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

El presente estudio se delimita al idioma español para su redacción y posterior publicación, con el fin de contribuir a la literatura técnica regional sobre el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en la industria de alimentos.

Bases de datos

La búsqueda de información se realizó en bases de datos científicas, a continuación, se presentan aquellas que se escogieron para ser consultadas:

- Google académico (<https://scholar.google.com/?hl=es>)
- Motor de búsqueda de la biblioteca de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (<https://stadium.unad.edu.co/>)
- EBSCO (<https://research-ebSCO-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/c/qcagk4/search>)
- Web of Science (<https://www-webofscience-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/wos/alldb/smart-search>)
- Dialnet (<https://dialnet.unirioja.es/>)
- Scielo (<https://scielo.org/en/>)

- ScienceDirect (<https://www-sciencedirect-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/>)
- Scopus (<https://www-scopus-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/pages/home>)
- PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)
- Redalyc (<https://www.redalyc.org/home.oa>)

Estrategia de búsqueda

La búsqueda documental se realizó en los idiomas inglés y español, utilizando las palabras clave y planteando las ecuaciones de búsqueda.

Tabla 1

Palabras clave y términos posibles

Palabras clave	Términos posibles	Búsqueda en inglés
Cascarilla de arroz	Cáscara de arroz	Rice husk, rice hull
Composición	Composición química, caracterización	
Aprovechamiento	Usos, aplicación, aplicaciones, producción	Utilization
Bioplásticos	Plásticos biodegradables, polímeros biodegradables	Bioplastics
Bioempaques	Envases de alimentos, envases biodegradables, envases activos, envases biobasados, empaques biodegradables, empaques de alimentos	Food Packaging, biobased
Biopelículas alimentarias	Películas biodegradables, películas comestibles, películas alimentarias, biopelículas	Biodegradable films

Industria alimentaria	Industria de alimentos, industria arrocera	Food industry
-----------------------	--	---------------

Nota. Se describen las palabras clave utilizadas, los términos o sinónimos que permiten una búsqueda más amplia y en los casos que se realizó búsqueda en inglés, se especifican las palabras usadas en ese idioma.

Tabla 2

Ecuaciones de búsqueda

Objetivo	Ecuaciones de búsqueda
Objetivo 1	("cascarilla de arroz" OR "rice husk" OR "rice hull") AND (composición OR caracterización OR "chemical characterization") AND (bioplástico* OR biopelícula* OR empaque* OR "food packaging") "biomasa lignocelulósica" AND celulosa lignina hemicelulosa AND (casca* OR cascarilla OR cáscara OR rice hull OR rice husk) AND "arroz"
Objetivo 2 y 3	"cascarilla" AND "arroz" AND (bioempaques OR biopelícula) AND (alimentos OR industria alimentos) ("cascarilla de arroz" OR "cáscara de arroz") AND (bioplástico* OR bioempaque* OR "película biodegradable" OR "recubrimiento comestible") AND alimentos ("cascarilla de arroz" OR "rice husk" OR "rice hull") AND (bioplástico* OR bioempaque* OR "película biodegradable") AND alimentos ("cascarilla de arroz" OR "rice husk" OR "rice hull") AND (envase activo OR "película biodegradable") AND alimentos

Nota. Se especifican las ecuaciones de búsqueda utilizadas para la búsqueda de información bibliográfica en el desarrollo de cada objetivo.

Criterios de selección

Se identifican como posibles criterios de inclusión/exclusión, a valorar en función de la naturaleza del estudio y sus necesidades, los siguientes:

Criterios de inclusión

Se seleccionaron fuentes de información como trabajos de grado, artículos científicos indexados, textos académicos, normativa técnica y documentos de repositorios institucionales publicados preferentemente entre 2016 – 2026, con el fin de garantizar la actualidad del estudio. Sin embargo, se admitió el uso de fuentes de mayor antigüedad para aportar definiciones teóricas fundamentales o antecedentes históricos clave para la comprensión del problema. En cuanto a las restricciones de idioma, no se ha aplicado filtro. Se priorizaron documentos que abordaran de manera explícita el aprovechamiento de la cascarilla de arroz o documentos de áreas transversales que concuerden con los objetivos y tema de investigación, disponibles mediante acceso abierto (OA) o suscripciones institucionales del sistema de bibliotecas por ser estudiante de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Para fortalecer la investigación, se aplicó una búsqueda inversa a partir de las referencias bibliográficas de los artículos seleccionados, lo que permitió identificar estudios relevantes no recuperados inicialmente mediante las ecuaciones de búsqueda.

Criterios de exclusión

Se excluyeron documentos e información sin rigor científico, estudios no relacionados con el área de alimentos o que no aportaran información relevante para la monografía (no pertinentes), y aquellos encontrados en bases de datos con acceso restringido.

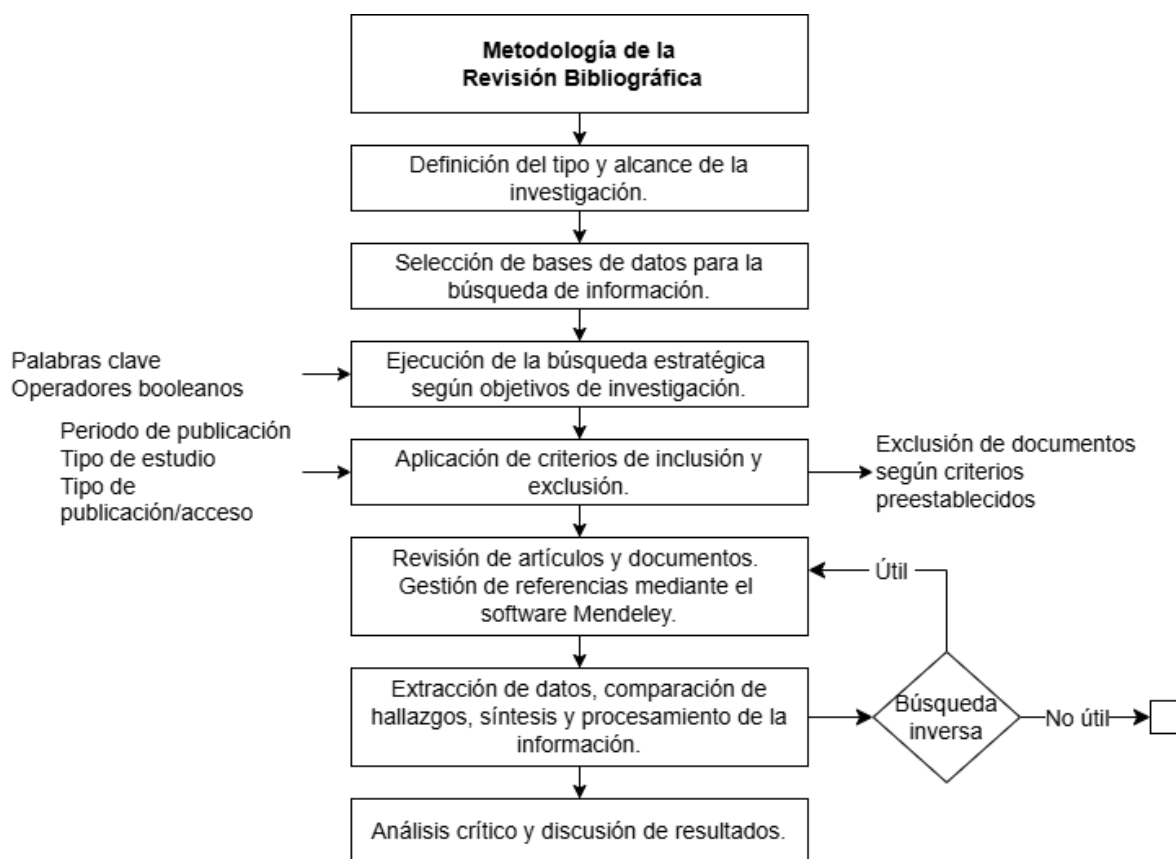
Gestor de referencias

La gestión y organización de las fuentes bibliográficas se realizó mediante el uso del gestor de referencias Mendeley, el cual permitió almacenar, clasificar y sistematizar los artículos científicos seleccionados, así como garantizar la correcta citación y elaboración de referencias bajo las normas APA.

La Figura 1 sintetiza y muestra de manera esquemática el flujo metodológico empleado para la consolidación de la presente revisión bibliográfica.

Figura 1

Diagrama de flujo de la metodología

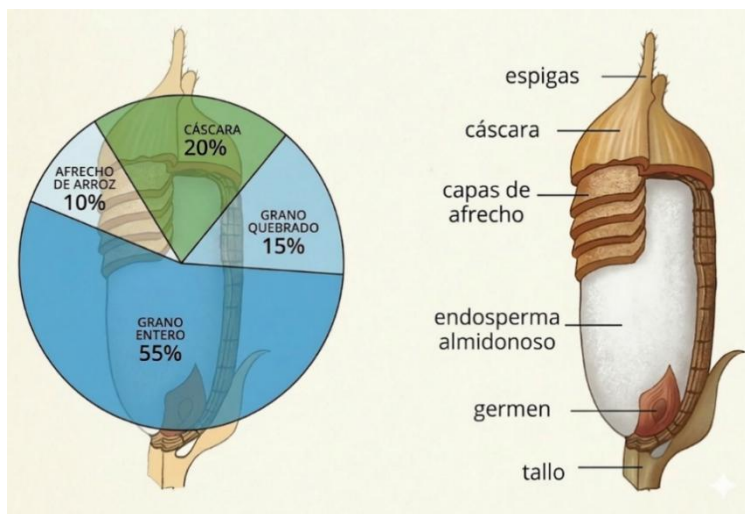


Capítulo 1. Composición química y estructural de la cascarilla de arroz y características bioactivas de interés reportadas en la literatura para la elaboración de biomateriales

La cascarilla de arroz es una fibra corta que recubre naturalmente el grano, siendo la capa más externa del grano de arroz y representa el 20 % de su peso (Torres, 2018), la Figura 2 representa gráficamente la estructura del grano de arroz, donde se observa que la cascarilla es la que brinda protección al grano sobre agentes externos como malezas, plagas, oxidación, pérdida de humedad y luz ultravioleta (Díaz, 2019).

Figura 2

Estructura del grano de arroz paddy



Nota. La imagen ilustra la distribución física del grano. Adaptado de Díaz (2019).

Características químicas

Para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en la elaboración de biomateriales como películas y empaques destinados al envasado de alimentos, resulta fundamental comprender su composición química, estructural y propiedades de interés. La Tabla 3 expone el análisis

proximal, el cual ofrece una caracterización macroscópica de sus componentes, encontrando que la cáscara está constituida principalmente por fibra, seguido del contenido de cenizas, en el cual se concentra un contenido de dióxido de sílice (SiO_2) superior al 90 %, compuesto considerado altamente reactivo que afecta la biodegradabilidad de la cascarilla (Tenorio y Martínez, 2019; Zambrano-Zambrano et al., 2021). Mientras que presenta un bajo contenido de proteínas, lípidos y carbohidratos como el almidón (Pincioli, 2011).

Tabla 3

Composición proximal cascarilla de arroz

Cascarilla de arroz	Proteína	Lípidos	Almidón	Fibra cruda	Fibra dietaria	Cenizas
(%)	2,3–3,2	0,4–0,7	1,8	40,1-53,4	77,3	15,3-24,4

Nota. Datos calculados en base seca. Adaptado de Pincioli (2011).

Tabla 4

Composición química y estructural de la cascarilla de arroz

Cascarilla de arroz	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
(%)	35-40	15-25	20-25

Nota. Adaptado de “A full utilization of rice husk to evaluate phytochemical bioactivities and prepare cellulose nanocrystals”, por Gao et al., 2018, *Industrial Crops and Products*; y de *Aprovechamiento de la cáscara de arroz para la producción de bioplásticos* [Tesis de grado], por Montenegro, 2020. Elaboración propia.

Partiendo de los datos del análisis proximal, es fundamental profundizar en la caracterización estructural del material. Dado que la fibra constituye la fracción lignocelulósica

de la cascarilla, la Tabla 4 desglosa la fracción fibrosa en sus componentes estructurales, indicando la composición porcentual de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

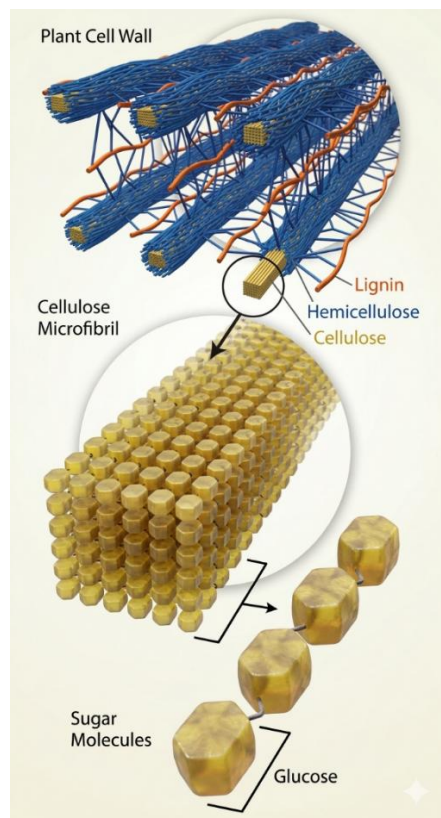
En la revisión bibliográfica se evidencian variaciones en la composición reportada en la literatura. Mientras Diaz (2019), Gao et al. (2018) y Montenegro (2020) presentan resultados cercanos y señalan contenidos de hemicelulosa entre 15 % y 25 %, Torres (2018) reporta un valor significativamente menor (4,16 %), lo que sugiere posibles diferencias asociadas al origen de la cascarilla, condiciones de cultivo o métodos de caracterización empleados. A pesar de esta variabilidad en la composición química, resulta fundamental analizar la función de estos componentes dentro de la estructura de la cascarilla de arroz, ya que esta determina sus propiedades funcionales y su comportamiento en aplicaciones como la elaboración de biomateriales.

Características estructurales

La pared celular de la cáscara de arroz está constituida por una matriz compleja de lignocelulosa unida por lignina y hemicelulosa (Zambrano-Zambrano et al., 2021) tal como se observa en la Figura 3. La celulosa es un homopolisacárido de cadena lineal insoluble en agua, formado por unidades de D-glucopiranosas, este polímero estructural presenta regiones amorfas y mayormente regiones cristalinas que le confieren alta rigidez, resistencia mecánica y estabilidad. Por otro lado, la hemicelulosa corresponde a un heteropolisacárido ramificado de estructura compleja, integrado por pentosas, hexosas y sus respectivos ácidos, mientras que la lignina es un heteropolímero aromático, amorfo, insoluble en agua, basado en unidades de fenilpropano (Boey et al., 2022; Montenegro, 2020).

Figura 3

Estructura de la biomasa lignocelulósica



Nota. Se expone la conformación de las fibrillas de celulosa, rodeadas por la hemicelulosa y la lignina, dentro de la estructura de la pared celular vegetal. Adaptado de Torgbo et al. (2021).

Esta composición estructural determina las propiedades funcionales aportadas por este material. Particularmente, la celulosa destaca por sus propiedades filmogénicas, permitiendo la formación de películas resistentes y estructuralmente estables, asimismo, presenta propiedades de barrera como la baja permeabilidad a los gases y favorece la liberación controlada de compuestos activos, como agentes antioxidantes y antibacterianos, mejorando sus propiedades como biopolímero. Gracias a su abundancia, biodegradabilidad y capacidad para conformar materiales seguros y comestibles, este polímero se posiciona como una materia prima de alto interés para la industria (Robertson, 2013; Romão et al., 2022).

Esta relevancia se extiende a sus derivados más comunes, como los éteres de celulosa, entre los que destacan la carboximetilcelulosa (CMC), un polímero de alto peso molecular que exhibe gelificación térmica y es capaz de formar películas biocompuestas rellenas (Gupta et al., 2019; Robertson, 2013; Romão et al., 2022). De hecho, las fibras de celulosa obtenidas de la cáscara de arroz han resultado prometedoras para la elaboración de materiales poliméricos compuestos debido a su bajo costo y buenas propiedades mecánicas, sin embargo, debido a la naturaleza protectora bioquímica y estructural de la matriz lignocelulósica, su obtención es un proceso complejo (Boey et al., 2022; Zambrano-Zambrano et al., 2021).

El aprovechamiento eficaz de la celulosa en la elaboración de nuevos materiales se ve limitado por la estructura compleja de la biomasa. La hemicelulosa a través de enlaces hidrógeno une las fibras de celulosa para proporcionar soporte y resistencia a la pared, este empaquetamiento dificulta el acceso a la celulosa, lo que hace necesaria su remoción (Montenegro, 2020; Zambrano-Zambrano et al., 2021). Por otro lado, la lignina cumple una función de soporte estructural en la pared celular, sin embargo, resulta tóxica para los microorganismos e inhibe la hidrólisis de los polímeros. Además, el alto contenido de sílice presente en la lignina como en las cenizas hace necesaria su eliminación mediante tratamientos químicos, facilitando el acceso de los microorganismos a los azúcares fermentables para la síntesis de bioplásticos (Montenegro, 2020).

El proceso de obtención de celulosa a partir de residuos lignocelulósicos comprende tres etapas: reducción del tamaño de partícula, tratamiento químico (alcalino o ácido) y blanqueamiento. Respecto al tratamiento alcalino, Zambrano-Zambrano et al. (2021) reportan que el tratamiento con hidróxido de sodio logra un rendimiento del 96 % al saponificar los enlaces entre hemicelulosa y lignina, esto disminuye el grado de polimerización y cristalización,

logrando romper los enlaces y eliminar eficazmente ambos componentes para obtener fibras de celulosa casi puras, siendo una materia prima ideal para la elaboración de empaques biodegradables.

Las investigaciones orientadas al aprovechamiento de la cascarilla de arroz en materiales de envasado de grado alimenticio destacan a la celulosa como componente estructural clave, sin embargo, el uso de otros polímeros también resulta relevante. El almidón es un polisacárido compuesto por amilosa y amilopectina, que posee propiedades funcionales como la gelatinización y retrogradación (Guamán, 2022). Específicamente, un elevado contenido de amilosa facilita el desarrollo de películas transparentes, con mayor capacidad filmogénica y resistencia mecánica, ideales para la fabricación de plásticos y películas de origen biológico (Collazo-Bigliardi et al., 2019; Parra Pérez, 2019). Si bien la composición química de la Tabla 3 evidencia un bajo contenido de almidón en la cascarilla de arroz, su aprovechamiento puede ser valioso para la obtención de materiales compuestos.

Este comportamiento estructural ha sido respaldado por estudios que destacan de la incorporación de componentes obtenidos de la cascarilla de arroz como agentes de refuerzo en bioplásticos o biopelículas, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas (Boey et al., 2022).

Características bioactivas de interés

Dentro de las propiedades bioactivas de la cascarilla de arroz, las de mayor relevancia reportadas en la literatura corresponden a su actividad antioxidante, derivada principalmente de su contenido de compuestos fenólicos (Bustamante-Bernedo et al., 2025; Collazo-Bigliardi et al., 2019; Wanyo et al., 2014). Los compuestos fenólicos, cuya estructura química presenta un anillo aromático con uno o más grupos hidroxilo unidos, son los derivados antioxidantes más activos en las plantas y se encuentran principalmente en las capas externas del grano, como la cáscara y

el salvado, donde cumplen la función de proteger frente al estrés oxidativo (Wanyo et al., 2014). Su actividad antioxidante se atribuye a su capacidad de donar hidrógeno o electrones, así como a su participación en la eliminación de radicales libres (Balasundram et al., 2006; Collazo-Bigliardi et al., 2019; Bustamante-Bernedo et al., 2025).

Los residuos agroindustriales lignocelulósicos, como la cáscara de arroz, son ricos en polifenoles, los cuales se encuentran mayoritariamente ligados a la matriz lignocelulósica, mientras que solo una fracción menor está disponible en forma soluble libre. Estos compuestos exhiben propiedades funcionales relevantes, como la capacidad de controlar procesos oxidativos y microbianos (Collazo-Bigliardi et al., 2019).

El contenido fenólico total reportado en la literatura presenta variaciones significativas. Bustamante-Bernedo et al. (2025) reportan valores entre 10 y 30 mg/g de masa seca, mientras que Collazo-Bigliardi et al. (2019) valores entre 60–67 mg EAG/g y Piñeros y Sierra (2018) registran un contenido fenólico de 12,27 mg EAG/100 g de masa seca ($\approx 0,1227$ mg EAG/g). Estas diferencias significativas se atribuyen a factores como la variedad del arroz, las condiciones de cultivo, los métodos de extracción y la reducción del tamaño de partícula (Wanyo et al., 2014). Entre los principales compuestos fenólicos identificados se encuentran ácido vainílico, ácido ferúlico, ácido *p*-cumárico, ácido cafeico, ácido siríngico y quercetina (Bustamante-Bernedo et al., 2025). Esta diversidad en el contenido y tipo de compuestos fenólicos incide directamente en la capacidad antioxidante del material, determinando su funcionalidad en distintas aplicaciones.

La oxidación lipídica es una de las causas principales del deterioro de los alimentos, ya que disminuye el valor nutricional, genera olores y cambios indeseables (Badui, 2006; Romão et al., 2022). Para garantizar la calidad y seguridad, la industria alimentaria ha utilizado

tradicionalmente antioxidantes sintéticos como el butilhidroxianisol (BHA), el butilhidroxitolueno (BHT) y la terbutil hidroquinona (TBHQ) (Balasundram et al., 2006). Sin embargo, debido a preocupaciones sobre su toxicidad, las tendencias actuales se orientan hacia el uso de antioxidantes naturales. En este contexto, los sistemas de envasado activo han cobrado relevancia, ya que la liberación de compuestos bioactivos hacia el alimento y la atmósfera interna del envase contribuye a preservar su calidad y prolongar su vida útil (Chawla et al., 2021; Romão et al., 2022). Lo anterior valida el uso de la cascarilla de arroz como fuente de compuestos bioactivos para aplicaciones en el envasado de alimentos.

Capítulo 2. Aplicaciones de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas y otros materiales de envasado para alimentos

Los materiales de envasado no solo contribuyen a la protección física y a la comercialización de los productos, sino que también pueden desempeñar funciones activas que permiten extender su vida útil (Robertson, 2013). Las investigaciones recientes se han centrado en el desarrollo de sistemas de envasado activo y sostenible, capaces de preservar la calidad y las características sensoriales de los alimentos a lo largo del tiempo. Un ejemplo de ello son las películas derivadas de biopolímeros, que han demostrado ser una excelente matriz para aplicaciones en el envasado de alimentos (Chawla et al., 2021).

La cáscara de arroz es un valioso subproducto agroalimentario, ya que constituye una fuente natural de polímeros estructurales y compuestos antioxidantes (Bustamante-Bernedo et al., 2025; Gao et al., 2018; Kargarzadeh et al., 2017). Su transformación en materiales para el envasado de alimentos implica una serie de tratamientos orientados al acondicionamiento de la materia prima y a la obtención de compuestos de interés, los cuales posteriormente se incorporan en matrices poliméricas para la elaboración de biopelículas y otros envases de origen biológico.

En este sentido, el aprovechamiento de residuos agroindustriales es relevante a nivel académico e industrial, ya que representa una alternativa de solución frente a la problemática asociada a la generación de residuos y, al mismo tiempo, permite el desarrollo de nuevos productos. Esto contribuye a la innovación en la industria alimentaria y favorece la implementación de principios de economía circular y sostenibilidad (Kargarzadeh et al., 2017; Ramírez, 2023). El potencial de aprovechamiento de la cascarilla de arroz se ve respaldado por diversas investigaciones enfocadas a la elaboración de películas y envases destinados al uso alimentario (Collazo-Bigliardi et al., 2018; Guamán, 2022; Tenorio y Martínez, 2019).

Obtención de biopelículas a partir de la cascarilla de arroz

Dentro de los precursores para el envasado comestible se encuentran las películas, un material preformado en forma de láminas con un espesor menor a 250 μm destinado a entrar en contacto con alimentos. Estas biopelículas actúan como una barrera frente a la transferencia de humedad y gases, además preservan compuestos volátiles y funcionan como matrices portadoras de agentes activos, logrando prolongar la vida útil de los alimentos. Es necesario resaltar que no están diseñadas para reemplazar a los sistemas de envasado convencionales, sino que los complementan, ya que pueden ser utilizados como recubrimientos internos de envases multicapa o como envases primarios para mejorar la calidad y vida útil del producto (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012, art. 3; Robertson, 2013).

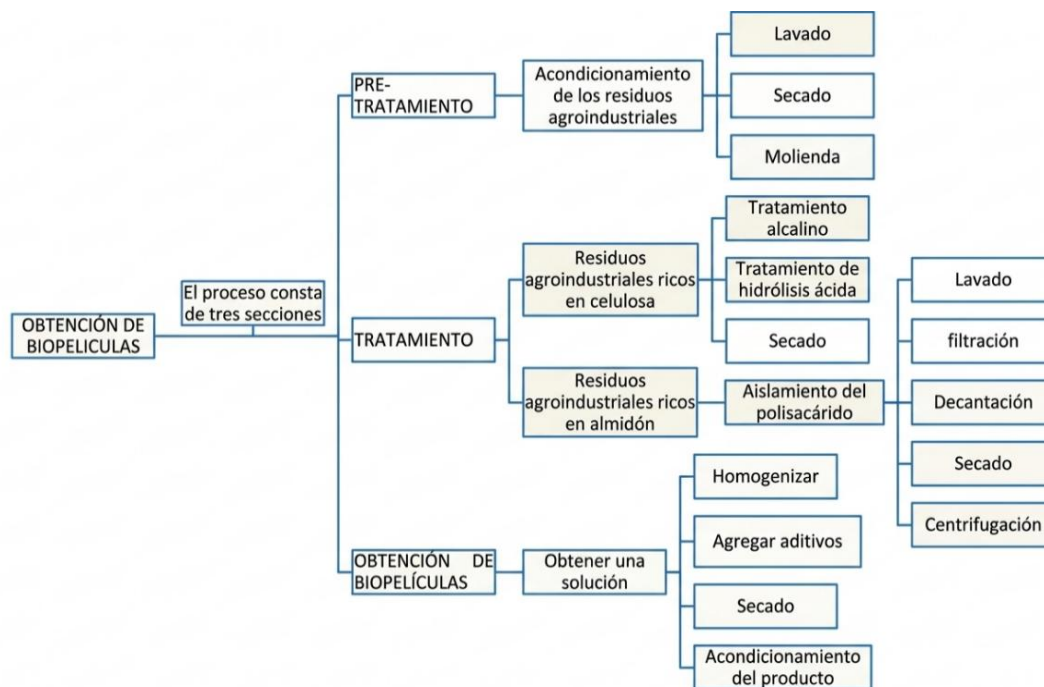
Conza (2020) estudió la obtención de biopelículas a partir de residuos agroindustriales para el empaqueo de alimentos, en su investigación establece que este proceso sigue una metodología de tres fases críticas: (a) Pretratamiento, donde se acondicionan los residuos; (b) tratamiento, enfocado a la eliminación de sílice, lignina y hemicelulosa para el aislamiento o extracción del compuesto de interés; y (c) obtención de la biopelícula, en esta fase se formula y mezcla el componente obtenido con otras materias primas para la formación del material; estas fases se representan en la Figura 4.

Como se observa en la Figura 4, es necesario un pretratamiento físico o acondicionamiento inicial de la materia prima, en este caso de la cascarilla de arroz, que consiste en el lavado, secado y molido, con el fin de reducir el tamaño de partícula y obtener un polvo que permite aprovechar sus componentes estructurales o activos. Este pretratamiento es fundamental para disminuir el grado de polimerización y cristalización, para posteriormente facilitar el acceso del ácido o del álcali a las zonas cristalinas de la estructura lignocelulósica, por

lo que es una etapa clave que puede influenciar las características finales de la película obtenida (Boey et al., 2022; Conza, 2020; Zambrano-Zambrano et al., 2021).

Figura 4

Esquema de fases para la obtención de biopelículas



Nota. Se representan las fases y procedimientos comúnmente utilizados para la obtención de biopelículas. Adaptado de Conza (2020).

Métodos de extracción y aislamiento de biopolímeros y compuestos bioactivos para la síntesis de películas

La literatura científica evidencia que para la producción de películas se han utilizado diversos polisacáridos, proteínas y lípidos por ser materias primas renovables. Dentro de los polímeros extraídos directamente de la biomasa destacan el almidón y la celulosa (Robertson,

2013), los cuales pueden obtenerse a partir de la cascarilla de arroz a través de metodologías especializadas.

La extracción de celulosa comúnmente se realiza a través de tratamiento ácidos o alcalinos, donde los componentes solubles de la fibra se disuelven en una solución ácida o alcalina durante varias horas para eliminar la región amorfa de la hemicelulosa y la lignina. Posteriormente, se aplica un blanqueado con agentes oxidantes fuertes para eliminar impurezas y residuos no celulósicos, obteniendo un producto más blanco, el cual se lava, filtra y seca hasta obtener fibras de celulosa purificadas. Estos tratamientos modifican la composición química mediante la sustitución de los grupos hidroxilo de la celulosa por enlaces hidrofóbicos, lo que reduce la absorción de agua del material. Cabe resaltar que el grado de sustitución y longitud en la cadena polimérica afectan la permeabilidad, solubilidad y propiedades de barrera (Boey et al., 2022; Conza, 2020; Zambrano-Zambrano et al., 2021).

Los tratamientos biológicos para la extracción de celulosa utilizan microorganismos o enzimas para fragmentar las moléculas complejas de biomasa en sus constituyentes y modificar la composición químico-estructural de la fibra de modo que sea más susceptible a la digestión enzimática, logrando despolimerizar la celulosa y la hemicelulosa, además de degradar la lignina. A diferencia de los métodos físicos y químicos, el tratamiento biológico opera bajo condiciones de baja severidad que minimizan el consumo energético. Al no emplear reactivos químicos, se omiten las etapas de lavado y desintoxicación; asimismo, se evita la generación de sustancias inhibitoras o indeseables. Sin embargo, la necesidad de mantener condiciones muy específicas para lograr una deslignificación efectiva, hace que su aplicación industrial sea más restringida y menos utilizada (Boey et al., 2022).

Para producir películas a partir de la celulosa, se debe realizar la eterificación, que implica la sustitución de grupos hidroxilo por grupos acetato o metilo; dentro de los éteres más comunes se encuentra la carboximetilcelulosa (CMC) (Robertson, 2013). Asimismo, a través de la modificación química de la celulosa se obtienen derivados como la nanocelulosa (NC), su extracción consiste en una hidrólisis ácida seguida de varios lavados hasta alcanzar un pH neutro, y finalmente se seca o liofiliza durante varias horas. Generalmente, cuando se agrega a una matriz polimérica aporta mejores propiedades mecánicas y de barrera en comparación con el polímero puro (Cholant et al., 2025). Por otra parte, los nanocristales de celulosa (CNC) producidos a partir del residuo se obtienen mediante procesos de deslignificación e hidrólisis ácida (Gao et al., 2018).

Por otro lado, el aislamiento de polímeros como el almidón se obtiene mediante tratamientos físicos. La cascarilla molida se lava con agua destilada y se filtra, dejando reposar durante varias horas hasta formar un sedimento de almidón, que luego se decanta para eliminar el sobrenadante. Posteriormente, el almidón es centrifugado con agua destilada a 800rpm durante unos minutos para eliminar los residuos, esto se debe repetir varias veces. Finalmente, el sedimento se seca a 50°C durante 24 h para luego ser pulverizado (Conza, 2020).

La cáscara de arroz constituye una fuente natural de compuestos antioxidantes debido a su contenido de polifenoles. La extracción de estos compuestos puede realizarse mediante métodos convencionales, métodos asistidos como ultrasonido y microondas, o métodos emergentes como fluidos supercríticos y la extracción asistida por enzimas (Arega et al., 2026; Bustamante-Bernedo et al., 2025). En relación con esto, Bustamante-Bernedo et al. (2025) indican que el contenido total de polifenoles (CTP) del extracto puede variar en función de parámetros como el tipo de solvente, el tiempo, la velocidad de agitación y la temperatura. Por

otro lado, para la medición de la capacidad antioxidante se utiliza el método DPPH que se basa en la eliminación de radicales libres de 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) por agentes antioxidantes (Conza, 2020).

Aplicaciones de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas

Como se mencionaba anteriormente, a partir del tratamiento de la biomasa se pueden obtener componentes valiosos que pueden ser aprovechados para la elaboración de películas de origen biológico. La Tabla 5 presenta una comparación técnica de diversos estudios sobre las aplicaciones de la cascarilla de arroz en el envasado de alimentos. Esta tabla sintetiza los objetivos de investigación, las matrices poliméricas empleadas, el componente específico derivado de la cascarilla, así como los métodos de obtención y los procesos de síntesis final del material.

Tabla 5*Aplicaciones de la cascarilla de arroz en la elaboración de biopelículas comestibles*

Referencia (Autor y año)	Objetivo y matriz base	Componente utilizado de la cascarilla	Método de obtención	Proceso de elaboración de la biopelícula
Kargarzadeh et al. (2017)	Evaluar el refuerzo de película de almidón con fibra de cáscara de arroz.	Fibra de cáscara de arroz cruda, fibra de celulosa y nanocristales de celulosa (CNC)	La CA molida se mezcló con hidróxido de sodio al 4 %, se sometió a reflujo con agitación mecánica a 90 °C durante 2 h. En el blanqueo se añadió tampón de acetato, clorito acuoso (1,7 % en peso) y agua destilada, se sometió a reflujo a 90 °C por 4 h. Las fibras se lavaron con agua destilada y se secaron a temperatura ambiente. La celulosa se sometió a hidrólisis ácida a 45 °C con ácido sulfúrico al 65 % durante 30 min bajo agitación mecánica. Se centrifugó a 10000 rpm por 10 min. La suspensión se dializó contra agua destilada hasta pH constante de 5 a 6, para obtener CNC.	Se mezcló 5 % de almidón de yuca con 2,5 % de glicerol y los tres tipos de relleno: fibra cruda, fibras de celulosa y CNC. La CNC se sonicaron por 10 min con potencia de 60 W antes de agregarlas a la mezcla de almidón plastificado. Las mezclas se calentaron a 100 °C bajo agitación, hasta que gelatinizó. La mezcla se vertió en una placa de Petri y se secó a 60 °C toda la noche. Las películas se mantuvieron en una cámara seca con 30% HR durante una semana.
Piñeros y Sierra (2018)	Evaluar el efecto antioxidante del extracto de cascarilla de arroz sobre las propiedades fisicoquímicas de películas a base de almidón termoplástico y policaprolactona (PCL).	Extracto antioxidante rico en compuestos fenólicos.	Extracción líquida mediante reactor de alta presión a 160 °C y 10 bar durante 30 min, la fase sólida se centrifugó a 4000 rpm y se obtuvo el extracto.	La formulación 5 fue la óptima, con 71,28 % de almidón, 7,13 % de PCL y 0,21 % de sólidos solubles del extracto antioxidante. Se obtuvo la película por mezclado en fundido a 160 °C y 8 rpm durante 30 min y moldeo por compresión.
Collazo-Bigliardi et al. (2018)	Reforzar películas con fibras de celulosa obtenidas de la cascara de arroz y de café	Fibras de celulosa	La cascarilla molida se trató con hidróxido de sodio (NaOH) a 80°C durante 3 h para obtener las fibras. Posteriormente, se blanqueó con solución tampón de acetato, clorito de sodio (1.7 wt %) y agua destilada a 100	Las fibras de celulosa al 5 % se incorporaron a la matriz de almidón termoplástico (TPS) (relación almidón:glicerol:agua de 1:0.3:0.5 p/p). Luego se mezcló por fusión en una laminadora de dos rodillos (160 °C, 8 rpm, 30 min) hasta homogeneidad. Las láminas de TPS se cortaron en pellets y se

Referencia (Autor y año)	Objetivo y matriz base	Componente utilizado de la cascarilla	Método de obtención	Proceso de elaboración de la biopelícula
			°C por 4 h para eliminar la lignina residual. La muestra se lavó, filtro y seco hasta obtener fibras de celulosa purificadas.	acondicionaron (25 °C, 53 % HR, 1 semana). Se precalentaron por 5 min 4 g de pellets en láminas de teflón. Las películas se obtuvieron por compresión a 160 °C en dos etapas: 2 min a 30 bar y 6 min a 130 bar; luego se enfriaron durante 3 min y se acondicionaron a 25 °C y 53 % de HR.
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	Mejorar las propiedades de películas a base de almidón termoplástico mediante la incorporación de extractos activos y fibras de celulosa aisladas de la cáscara de arroz o de café.	Extracto antioxidante rico en compuestos fenólicos. Fibras de celulosa.	Molienda de cáscara (750 g) y tratamiento en reactor (3 L agua destilada, 180 °C, 9,5 bar, 60 min). Una vez separada la fracción sólida, el extracto se concentró a 90°C. Para el extracto en polvo se añadió 32,1 % de maltodextrina y se sometió a secado por aspersión (180 °C, 24.000 rpm). La fracción sólida se secó y trató con NaOH al 4% (relación 1:15, 80 °C, 3 h) bajo agitación. Se lavó y, luego, blanqueó con solución tampón acetato y clorito de sodio (1,7 %). Las fibras se lavaron, secaron y molieron.	Se obtuvieron películas de almidón de maíz plastificadas con glicerol (relación 1:0,3) y reforzadas con 5% de fibra de celulosa mediante mezcla en estado fundido y moldeo por compresión. La formulación óptima que usó CA fue S-70:30R-RF, que sustituyó parcialmente el glicerol en proporción 70:30. Las mezclas se cortaron y acondicionaron (25 °C y 53 % HR por 1 semana), luego se precalentaron 4 g de los gránulos por 4 min en una prensa de placa caliente. Las películas se obtuvieron comprimiendo a 160 °C durante 2 min a 30 bares, seguido de 6 min a 130 bares y un ciclo de enfriamiento final de 3 min y se acondicionaron a 25 °C y 53 % de HR por 1 semana.
Gupta et al. (2019)	Sintetizar películas alimentarias biodegradables a partir de la biomasa lignocelulósica de la cáscara de arroz y caña de azúcar.	CMC	Lavado de CA, secado en horno a 70 °C durante 16 h, molienda y tamizado en malla 60. Tratamiento alcalino con hidróxido de potasio (KOH) (6 % p/v) (eliminación de sílice). Hidrólisis con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) diluido al (4 %V/V) y blanqueamiento con clorito de sodio al 3 % (P/V) a 80 °C por un lapso de 4 h. Mercerización y eterificación de fibras de celulosa para obtener CMC.	Se diluyo 1g de CMC en 75 ml de agua a 70 °C por 15 min. Aparte se mezcló 1 g de almidón en 100 ml de agua y glicerol (40 ml/100g de almidón) y 0.5 g de ácido cítrico al 10 %. La mezcla de CMC y almidón se mezcló en agitación constante a 70 °C durante 15 min. Luego se secó a 55 °C en horno por 15 h, formando la película.
Guamán (2022)	Obtener bioplásticos a partir del almidón de Triticale y de cascarilla de Arroz	Almidón	Se licua la CA con agua destilada, se filtra y deja en reposo 12 h hasta formar sedimento, decantación de fase líquida, secado del sedimento a 50 °C durante 24 h.	Se prepara una solución de agua destilada y almidón a baño maria, adición de glicerol y ácido acético, la mezcla gelatinizada se sometió a secado en placas a temperatura ambiente a 21 °C durante a 48 h. La formulación optima (FM1) combinó 2,80 g de almidón

Referencia (Autor y año)	Objetivo y matriz base	Componente utilizado de la cascarilla	Método de obtención	Proceso de elaboración de la biopelícula
	para el empaqueo de alimentos.			de triticale y CA en proporciones 50:50, 0,80 ml de glicerina (plastificante), 30 ml de agua destilada y 2,00 ml de ácido acético (conservante).
Srivastava et al. (2023)	Elaborar película con propiedades antimicrobianas utilizando fibra de cáscara de arroz como refuerzo y cloruro de benzalconio (BKC) como agente activo.	Fibras de celulosa	La CA se molió y tamizó para obtener el polvo para la extracción de fibra, pero los autores no describen el método utilizado.	El almidón de maíz, el glicerol y sorbitol se disolvieron en 160 ml de agua destilada, luego se agitó a 80 °C, 300 rpm, 30 min. Se incorporaron las fibras de cáscara de arroz (CA) a la solución. Una vez alcanzada la temperatura ambiente, adición con jeringa el BKC (700 rpm), la solución viscosa reposos en horno por 15 min, posteriormente, se transfirió a caja de Petri y se secó a 50 °C durante 6 h. Luego se secó a temperatura ambiente por tres días. La R2/B1 fue la mejor formulación con 20 % de fibra y 0,05 % de BKC.
Cholant et al. (2025)	Elaboración de películas de alcohol polivinílico reforzadas con nanocelulosa de cáscara de arroz.	Nanocelulosa (NC)	Se lavó, seco y pretrató la cáscara hasta tener un polvo; tratamiento alcalino con hidróxido de sodio 10 % p/v, luego se blanqueó sumergiendo la fibra en hipoclorito de sodio al 2,5 % p/v durante 24 h, eliminando la lignina. Finalmente, se filtró, lavó y secó a 50 °C por 24 h. El aislamiento de NC consistió en la hidrólisis con ácido sulfúrico al 65% 1:20 p/v durante 90 min a 45 °C bajo ultrasonido. Luego se centrifugó, dializó y liofilizó por 48 h a 60 mmHg a -42 °C, obteniendo NC en polvo.	Para la película se preparó una solución de 5 g de PVA y 1 g de glicerol en 95 ml de agua destilada a 70 °C durante 60 min. Posteriormente se integró la NC, se colocó 20 ml sobre placas de vidrio a secar en horno durante 24 h a 40 °C, obteniendo la película.

Nota. CA: cascarilla de arroz; CMC: carboximetilcelulosa; CNC: nanocristales de celulosa; HR: humedad relativa.

Las aplicaciones encontradas en la Tabla 5 respaldan el potencial de la cascarilla de arroz como una biomasa lignocelulósica de alto valor para el desarrollo de materiales renovables destinados al empaquetado de alimentos. Autores como Collazo-Bigliardi et al. (2018), Cholant et al. (2025), Gupta et al. (2019) y Srivastava et al. (2023) destacan las propiedades estructurales obtenidas de la celulosa, ya sea mediante la incorporación de fibras o sus derivados químicos; otro polímero valioso es el almidón, aunque tiene menor proporción en la cascarilla, también aporta propiedades estructurales a los materiales gracias a su contenido de amilosa (Guamán, 2022).

Otros autores destacan el uso de componentes bioactivos por su capacidad de interactuar funcionalmente con el alimento, como es el caso de Piñeros y Sierra (2018) y Collazo-Bigliardi et al. (2019), quienes obtuvieron un extracto rico en fenoles a partir de la cascarilla de arroz y lo incorporaron a su matriz, aportando propiedades antioxidantes a la película.

Si bien la cáscara de arroz es una biomasa abundante con propiedades funcionales para la elaboración de nuevos productos, al analizar los resultados de los autores, se encuentra la necesidad de combinar la cascarilla con otras materias primas o aditivos, optimizando así las propiedades finales de la película, garantizando su aplicación efectiva en el envasado de productos alimenticios (Boey et al., 2022). Por otro lado, Kargarzadeh et al. (2017) encontró que al reducir el tamaño de las fibras de celulosa a nano escala se mejora significativamente las propiedades mecánicas y de barrera del material final.

Las aplicaciones reportadas en la literatura científica actual sobre el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en la síntesis de películas para envasado de alimentos se encuentran en una etapa académica y experimental, pues los estudios analizados en la Tabla 5 no han alcanzado una transición al sector productivo masivo. A pesar de los avances significativos en la mejora de las

propiedades mecánicas y de barrera de las películas mediante la incorporación de biopolímeros y extractos activos, la transición hacia aplicaciones comerciales está limitada por retos en la escalabilidad industrial y los costos. Algunos estudios indican que los embalajes de base biológica fabricados a partir de residuos son de 3 a 5 veces más caros que los materiales derivados de combustibles fósiles (Chawla et al., 2021).

Uso de la cascarilla de arroz para envasado para alimentos.

Como se mencionaba anteriormente, la cascarilla de arroz tiene una composición químico-estructural valiosa que facilita la síntesis de diversos materiales destinados al envasado de alimentos. A diferencia de las investigaciones enfocadas en películas comestibles de origen biológico, otros autores han explorado el desarrollo de materiales renovables utilizados en la elaboración de envases para alimentos.

Este tipo de materiales pueden clasificarse como envases primarios, los cuales entran en contacto directo o indirecto con el producto alimenticio; o envases secundarios, que aportan protección adicional. Se distinguen de las películas por tener un mayor espesor y rigidez, ofreciendo una mejor contención y protección mecánica prolongada para los alimentos (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012, art. 3).

Tal es el caso de Tenorio y Martínez (2019), quienes desarrollaron un material experimental compuesto a partir de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) como refuerzo fibroso y harina de yuca (*Manihotesculenta*) como material aglutinante. La formulación óptima empleó cascarilla de arroz molida con un tamaño de partícula malla 20 o 40, a concentraciones de 50 – 60%, mezclada con la harina de yuca, 5% de glicerol y 57 % agua. El proceso de obtención se realizó mediante termoformado en una prensa de contacto (sandwichera) a 190 °C por 50 minutos para una masa de 400 g.

Si bien los autores proponen este material como una alternativa al poliestireno expandido, es importante resaltar la necesidad de escalar el experimento hacia sistemas de termo-prensado especializados que aseguren la homogeneidad estructural y eficiencia térmica. Asimismo, la validación de su viabilidad tecnológica es una de las brechas de esta investigación que requiere ser abordada antes de considerarlo una alternativa para el envasado de alimentos. A pesar de ello, este proyecto es relevante en el contexto de la investigación nacional, ya que promueve el desarrollo de estudios experimentales orientados al aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima para la obtención de materiales renovables capaces de minimizar el uso de materiales sintéticos tradicionales y mitigar el impacto ambiental asociado a los residuos agroindustriales.

Asimismo, Mena-Chacon et al. (2025) demostraron la viabilidad de producir bandejas biodegradables a partir de almidones extraídos de residuos agroindustriales, como las semillas de lúcuma y aguacate, y reforzados con fibras de cáscara de arroz (en proporción de 6 y 14 %), ya que la adición de las fibras de cáscara de arroz mejoró significativamente la resistencia a la tracción y la dureza en comparación a las bandejas biodegradable formuladas sin la adición de fibra.

Se identifica un proyecto en colaboración entre la Universidad de Concepción (UDT) y la empresa BioGusto (Chile), donde se desarrollaron prototipos industriales de bandejas biodegradables a partir de cascarilla de arroz para el envasado de aves frescas. Este proyecto demuestra la viabilidad técnica de procesar la cascarilla de arroz mediante extrusión y termoformado, cumpliendo con estándares técnicos de la industria alimentaria (UDT Universidad de Concepción, 2022).

Figura 5.

Bandejas biodegradables de cascarilla de arroz.



Nota. Tomado de UDT Universidad de Concepción (2023).

Por otro lado, Montenegro (2020) exploró este tema desde un enfoque biotecnológico, como lo es el aprovechamiento de los azúcares fermentables presentes en la cascarilla para la síntesis de biopolímeros. Su investigación se centró en evaluar diferentes tratamientos aplicados a la cáscara de arroz para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA). El acondicionamiento inicial de la biomasa consistió en procesos de lavado, secado y molienda; posteriormente, se aplicó un tratamiento de hidrólisis ácida utilizando 10 ml de ácido sulfúrico diluido al 0,4 % (por gramo de CA) a 100°C durante 30 min para eliminar la lignina.

Una vez filtrado, este proceso se complementa con la explosión de vapor flash (1,8 MPa por 5 min). La combinación de ambos tratamientos permite obtener mayor concentración de azúcares fermentables derivados de la celulosa y hemicelulosa. Estos azúcares son metabolizados por microorganismos *Bacillus* o *Cupriavidus necator*, sintetizando PHA. Este es un bioplástico natural, no tóxico, biodegradable y compostable, con propiedades comparables a plásticos fósiles convencionales, como el polietileno y el polipropileno.

Al respecto, Kusuma et al. (2024) exponen que las aplicaciones industriales de los PHA incluyen la fabricación de envases de alimentos y productos de un solo uso aptos para el contacto con alimentos. No obstante, su adopción a escala industrial se ve limitada por factores como los altos costos de producción, las deficiencias mecánicas y los desafíos asociados a la escalabilidad. De acuerdo con esto, Lackner et al. (2023) destacan que uno de los principales factores que limita el uso generalizado de los bioplásticos es el alto costo de la producción a pequeña escala.

Estas investigaciones respaldan el potencial que tiene la cascarilla de arroz como materia prima en la síntesis de biopolímeros y materiales utilizados en la elaboración de envases para alimentos. Asimismo, los hallazgos resaltan la necesidad de seguir profundizando las investigaciones para optimizar los procesos de transformación y garantizar que el escalamiento industrial sea rentable. Jafarzadeh et al. (2025) menciona que las investigaciones futuras deben mitigar la brecha de rendimiento entre los materiales de envasado de base biológica y los plásticos convencionales derivados del petróleo.

Capítulo 3. Propiedades tecnológicas de las biopelículas elaboradas con cascarilla de arroz para el envasado de alimentos

La industria del envasado sostenible de alimentos busca ofrecer alternativas de origen biológico y renovable que puedan competir con plásticos tradicionales (Robertson, 2013). El reconocimiento de las propiedades tecnológicas es un paso determinante para establecer la viabilidad industrial de un material de envase, ya que estas definen su capacidad de proteger y prolongar la vida útil del alimento.

Los materiales compuestos se obtienen mediante la incorporación de fases dispersas (fibras o partículas) dentro de una matriz continua, lo que permite modificar y optimizar la estructura interna del material (Ashby et al., 2007). En consecuencia, el desempeño mecánico y funcional de estos materiales depende de la composición de la matriz, las características de la fase dispersa y la interacción entre ambas (Boey et al., 2022).

Dada la disponibilidad de información en la literatura, la identificación de las propiedades tecnológicas se centró en biopelículas, al ser el material más estudiado en el desarrollo de sistemas de envasado para alimentos. Como se observa en la Tabla 5, autores como Collazo-Bigliardi et al. (2018), Collazo-Bigliardi et al. (2019), Guamán (2022), Gupta et al. (2019), Piñeros y Sierra (2018), Srivastava et al. (2023) han desarrollado biopelículas compuestas a partir de matrices de almidón plastificadas con glicerol. Estas matrices presentan buena capacidad filmogénica y propiedades de barrera a los gases, pero limitada resistencia mecánica y alta sensibilidad al agua en comparación con polímeros sintéticos convencionales (Ghanbarzadeh et al., 2011). Por esta razón, han incorporado polímeros o extractos derivados de la cáscara de arroz para mejorar el desempeño del material. Asimismo, algunos investigadores

emplean como matriz el alcohol polivinílico (PVA), conocido por su capacidad filmogénica, aunque asociado a un mayor costo (Cholant et al., 2025).

En este capítulo se evalúan las propiedades tecnológicas de las biopelículas reforzadas con componentes obtenidos de la cáscara de arroz y se comparan con plásticos de origen fósil utilizados convencionalmente.

Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de un material describe su respuesta frente a la aplicación de cargas o fuerza aplicada (Callister y Rethwisch, 2018). Estas propiedades son fundamentales para la industria del envasado de alimentos, ya que determinan la capacidad del material para resistir deformaciones y proteger el producto frente a daños mecánicos durante su manipulación y almacenamiento. La Tabla 6 presenta los resultados que tuvieron los autores en la caracterización mecánica de las películas según la norma ASTM D882, se analizan propiedades clave como la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura y el módulo de elasticidad, permitiendo observar cómo la interacción entre los componentes de la matriz define las propiedades mecánicas del empaque final.

La resistencia a la tracción (TS) se refiere al máximo esfuerzo que el material soporta antes de la fractura (Ashby et al., 2007; Robertson, 2013). La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos por diferentes investigadores en esta prueba, evidenciando que las películas de Guamán (2022), Piñeros y Sierra (2018) y Srivastava et al. (2023) presentan en común una baja resistencia, manteniéndose en un intervalo de 1,08 a 2,743 MPa que indica que estos materiales tienen menor resistencia mecánica que la de un plástico convencional de baja densidad, posicionándose como películas con baja protección mecánica. Por otro lado, las películas obtenidas por Collazo-Bigliardi et al. (2018), Collazo-Bigliardi et al. (2019) y Gupta et al. (2019)

presentan una resistencia moderada que demuestra un desempeño mecánico comparable al de polímeros convencionales como el polietileno de baja densidad (LDPE) que presenta un rango de 8,3 a 31,4 MPa en esta propiedad (Callister y Rethwisch, 2018, p. 514).

Tabla 6

Propiedades mecánicas en las biopelículas usando la cascarilla de arroz como materia prima

Referencia (Autor, año)	Resistencia a la tracción (MPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
Piñeros y Sierra (2018)	2,743	14,375	109,504
Collazo-Bigliardi et al. (2018)	t _i : 16,5 t _f : 7,9	t _i : 4 t _f : 14	t _i : 671 t _f : 339
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	12,1	16,4	541
Gupta et al. (2019)	12,72	12,69	—
Guamán (2022)	1,28	10,80	1,396
Srivastava et al. (2023)	1,08	12,4	24,5

Nota. t_i: muestreo inicial; t_f: muestreo final después de 28 semanas. El guion (—) indica que el autor no reportó valores para ese parámetro específico en el estudio original.

La ductilidad es una propiedad que indica la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente antes de la rotura y se mide con el alargamiento o elongación a la rotura (E%) (Ashby et al., 2007; Robertson, 2013). La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos por los investigadores, si bien la composición de la matriz de cada autor es diferente, obtuvieron resultados cercanos en un rango de 10,80 a 16,4%, lo que indica que las películas obtenidas tienen una ductilidad baja en comparación a plásticos convencionales como el LDPE (Callister y

Rethwisch, 2018, p. 514), estos valores lo caracterizan como un material técnicamente frágil, ya que durante su vida útil como envase de alimento algún esfuerzo repentino podría generar la rotura de la película.

El módulo de elasticidad o módulo de Young (ME) es la propiedad que mide la rigidez del material, es decir, indica la capacidad que tiene el material para resistir deformaciones elásticas (Ashby et al., 2007; Robertson, 2013). Según los datos de la Tabla 6, las formulaciones de Collazo-Bigliardi et al. (2018), Collazo-Bigliardi et al. (2019) y Piñeros y Sierra (2018) obtuvieron valores altos, lo que les confiere la característica técnica de ser materiales semirrígidos, pues superan la rigidez de plásticos convencionales como el polietileno de baja densidad (LDPE), pero son menos rígidos que el polietileno de alta densidad (HDPE) y el ácido poli láctico (PLA) (Boey et al., 2022; Callister y Rethwisch, 2018, p. 514).

El desempeño superior del módulo de elasticidad de Collazo-Bigliardi et al. (2018) frente a Srivastava et al. (2023), quienes incorporaron fibras de celulosa de la cascarilla de arroz, se atribuye al grado de purificación de las fibras y a la composición de la matriz. Como detalla la Tabla 5, Collazo-Bigliardi et al. (2018) aplicaron un tratamiento químico especializado para obtener fibras de celulosa con 74% de pureza, asociada a una alta cristalinidad que favorece la formación de una red como refuerzo estructural eficiente en la matriz (Robertson, 2013). Mientras que Srivastava et al. (2023) no reportan un proceso de deslignificación ni el grado de pureza de sus fibras, lo que sugiere una eliminación parcial de lignina y hemicelulosa que limitan el desempeño técnico de la celulosa. Guamán (2022) y Srivastava et al. (2023) tuvieron los resultados más deficientes en esta propiedad, caracterizando al material con escasa rigidez que combinado con la baja resistencia (TS) y ductilidad (E%) indica que sus aplicaciones en el

envasado de alimentos estarían enfocadas como película o recubrimiento comestible para la mejorar la vida útil del alimento, mas no para protegerlo de daños mecánicos (Robertson, 2013).

Al analizar los resultados consolidados en la Tabla 6, se evidencia que la película elaborada por Guamán (2022) presenta los valores más inferiores en las tres propiedades mecánicas analizadas (TS: 1,28 MPa, EM: 1,396 MPa, E%: 10,80%). Este resultado puede relacionarse con la composición de la matriz base, ya que dependiendo del tipo de refuerzo y su relación proporcional varia la caracterización del material (Boey et al., 2022); mientras que los demás investigadores integraron celulosa (en forma de fibras o derivados), Guamán (2022) se basó en la adición de almidón extraído del triticale (un cereal que procede del cruce entre trigo y centeno) y de la cáscara de arroz, careciendo del refuerzo estructural necesario para optimizar el desempeño mecánico de la película. Por otro lado, la incorporación de glicerol es fundamental para generar el efecto plastificante en las películas con almidón, sin embargo, una alta concentración en relación con el peso del polímero altera las propiedades tecnológicas; específicamente, incrementa la flexibilidad, derivando una estructura menos rígida y obteniendo una disminución en la resistencia a la rotura y el módulo de elasticidad (Alves et al., 2007; Guamán, 2022; Navia Porras, 2015).

Finalmente, un hallazgo diferenciador en Collazo-Bigliardi et al. (2018) fue la evaluación de la estabilidad del efecto reforzante en dos tiempos de muestreo: inicial (t_i) y tras 28 semanas (t_f). Después de 28 semanas de almacenamiento bajo condiciones controladas, se evidenció una disminución en el módulo elástico (339 MPa) y en la resistencia a la tracción (7,9 MPa) en comparación con los valores de la caracterización inicial. Por el contrario, el alargamiento a la rotura (14%) aumentó; este comportamiento se atribuye al fenómeno de sorción progresiva de agua en las películas proveniente de la humedad ambiental (53% HR), lo cual genera el

reordenamiento de la matriz polimérica y favorece el aumento de la ductilidad. A pesar de ello, la película reforzada con fibras de celulosa de cáscara de arroz mantuvo un desempeño superior a la muestra control, demostrando que la película preservó el efecto reforzante durante el almacenamiento y confirmando que la formulación, respecto a sus propiedades mecánicas, es técnicamente viable para aplicaciones de envasado.

Propiedades de barrera

Las propiedades de barrera son fundamentales en el envasado de alimentos, ya que cumplen la función de mitigar el intercambio de sustancias entre el alimento y su entorno con el fin de prolongar la vida útil del producto (Robertson, 2013). Estas propiedades definen la capacidad de un material para resistir los fenómenos de sorción y difusión de gases y compuestos volátiles, garantizando así la integridad del producto frente a factores externos. De acuerdo con Piergiovanni y Limbo (2016), las propiedades de los materiales varían considerablemente según la naturaleza y combinación de los polímeros utilizados en la formulación. En el caso de las películas delgadas, la permeabilidad puede verse afectada tanto por la porosidad estructural de la superficie como por el efecto de solubilidad-difusión, Lo que resalta la importancia de diseñar materiales para el envasado de alimentos que cumplan con especificaciones técnicas de barrera necesarias para prolongar la vida útil del alimento (Robertson, 2013).

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) se refiere a la capacidad de las películas para resistir el paso de moléculas de vapor de agua a través de su estructura. En este sentido, un material con baja permeabilidad presenta un mejor desempeño como barrera, ya que limita la transferencia de humedad entre el alimento y el entorno (Trujillo, 2014). De acuerdo con Robertson (2013), esta propiedad es fundamental para evitar la pérdida de peso del producto y preservar su textura característica durante el almacenamiento.

La permeabilidad al oxígeno es la capacidad que tiene un material para permitir la difusión de moléculas de gases, como el oxígeno o dióxido de carbono, a través de su estructura. Una baja permeabilidad indica que un material es buena barrera a los gases (Robertson, 2013).

En este sentido, resulta necesario analizar los resultados reportados por diferentes autores con el fin de identificar el desempeño de barrera de los materiales reforzados con componentes derivados de la cáscara de arroz. En la Tabla 7 se presentan los valores correspondientes a la permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno.

Tabla 7

Propiedades de barrera de las biopelículas usando la cascarilla de arroz como materia prima

Referencia (Autor, año)	Permeabilidad	Permeabilidad al	
	Vapor de Agua (Barrer)	Oxígeno (Barrer)	Humedad (%)
Guamán (2022)	3,23	—	12,5
Piñeros y Sierra (2018)	1.220.285	0,0893	—
Collazo-Bigliardi et al. (2018)	529.957	0,5732	8,51 ^a
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	562.185	0,2800	—
Srivastava et al. (2023)	—	—	11,27

Nota. El guion (—) indica que el autor no reportó valores para ese parámetro específico en el estudio original. Para facilitar la comparación técnica, todos los valores de permeabilidad fueron convertidos a unidades de Barrer $1 \text{ Barrer} = 10^{-10} \cdot \text{cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$. ^a Este dato fue convertido de base seca a base húmeda para estandarizar la presentación de resultados. Los datos originales reportados por cada autor y factores de conversión se detallan en el Apéndice A.

Las películas a base de biopolímeros deben presentar un contenido de humedad igual o inferior a 14,84%, ya que valores elevados pueden afectar su integridad estructural, volviéndose más vulnerable a daños mecánicos y favoreciendo la proliferación de microorganismos (Trujillo, 2014, p. 69). Al analizar los datos consignados en la Tabla 7, se observa que los porcentajes de humedad de las biopelículas evaluadas se encuentran por debajo de este límite, lo que sugiere un comportamiento adecuado desde el punto de vista tecnológico.

Al comparar los resultados de los autores es preciso decir que la película de Guamán (2022) tiene mejor permeabilidad al vapor de agua que plásticos convencionales como el polietileno de baja densidad (LDPE) y el polietileno de alta densidad (HDPE), dos plásticos de origen fósil que se caracterizan por ofrecer una buena barrera contra la humedad, teniendo una permeabilidad de 80 y 13 Barrer respectivamente (Robertson, 2013, p. 108). Esto quiere decir que el alimento cubierto con la biopelícula de Guamán (2022) tiene mayor protección a la humedad que la que tendría al estar envasado en otros plásticos comerciales, cumpliendo con el objetivo de evitar el paso de moléculas de vapor de agua entre los alimentos y el ambiente.

La mayoría de los investigadores obtuvieron valores altos en la permeabilidad al vapor de agua, esto se atribuye a la naturaleza higroscópica de la celulosa y a la formación de una red porosa en la matriz que permite el paso del vapor de agua con mayor facilidad que plásticos de origen fósil (Collazo-Bigliardi et al., 2018). Este comportamiento coincide con lo expuesto por Kargarzadeh et al. (2017), quienes analizaron que el tamaño del relleno es determinante en el desempeño de la barrera, encontrando que la adición de fibras de celulosa generan una estructura porosa con mayor tasa de absorción agua, mientras que la adición de nanocristales de celulosa (CNC) forma superficies más lisas y homogéneas que favorecen la adhesión e interacción entre

el relleno y la matriz, previniendo la permeación y difusión de moléculas de agua en comparación con las fibras de escala macroscópica.

Respecto a la permeabilidad al oxígeno, las biopelículas de Collazo-Bigliardi et al. (2018), Collazo-Bigliardi et al. (2019) y Piñeros y Sierra (2018) presentaron valores bajos, caracterizándose técnicamente como materiales con buena barrera a gases como el oxígeno. Esto les confiere una característica interesante frente a plásticos convencionales como el LDPE, que tiene una barrera deficiente al oxígeno, con valores de 3,0 a 6,7 Barrer, al igual que el HDPE con valores de 0,6 a 1,1 Barrer (Robertson, 2013, p. 108).

Por otro lado, Collazo-Bigliardi et al. (2018) observaron que la presencia de fibras de celulosa en matrices de almidón mejoró ligeramente la barrera al oxígeno, aproximadamente un 17% menos que la muestra control, pero no redujo significativamente la permeabilidad al vapor de agua. Esto se debe a que la celulosa, al ser un polímero estructural de cadena lineal, aporta propiedades filmogénicas que favorecen la formación de películas resistentes con baja permeabilidad a los gases (Robertson, 2013).

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Ghanbarzadeh et al. (2011) y Trujillo (2014), quienes mencionan que las películas a base de almidón presentan buenas propiedades de permeabilidad los gases (CO_2 y O_2); pero debido a su carácter hidrofílico, la permeabilidad al vapor de agua es alta.

La comparación con materiales convencionales de origen sintético, como el polietileno de baja y alta densidad, se emplea como referencia para identificar el desempeño de las biopelículas en el envasado de alimentos, reconociendo que, según la matriz polimérica y formulación pueden presentar limitaciones en propiedades mecánicas y de barrera, pero ofrecen ventajas en términos de sostenibilidad y funcionalidad.

Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas hacen referencia a la respuesta de un material al ser expuesto a la radiación electromagnética y la luz visible (Callister y Rethwisch, 2018). En esta sección se analizará específicamente la opacidad y translucidez de las películas obtenidas por diversos investigadores, a las cuales se les incorporó fibras o extractos obtenidos de la cascarilla de arroz.

Las propiedades ópticas están relacionadas con su grado de cristalinidad y con la organización de la estructura interna del polímero (Carraher, 2010, como se citó en Robertson, 2013). En este sentido, la translucidez y la opacidad son el resultado de la dispersión de la luz dentro del material, fenómeno que ocurre en materiales con imperfecciones superficiales, polímeros altamente cristalinos o en sistemas bifásicos, provocando la desviación de los haces de luz hacia la superficie posterior (Callister y Rethwisch, 2018; Robertson, 2013). Aunque los polímeros cristalinos tienden a ser translúcidos, pueden alcanzar transparencia cuando el tamaño de sus estructuras cristalinas es inferior a la longitud de onda de la luz visible (Robertson, 2013).

Este comportamiento teórico coincide con lo reportado por Cholant et al. (2025), quienes observaron que películas reforzadas con nanocelulosa, a pesar de presentar alta cristalinidad, exhiben una mayor transparencia en comparación con aquellas reforzadas con celulosa (Figura 6). Este efecto se atribuye al tamaño nanométrico de la nanocelulosa, que favorece la formación de superficies más lisas y homogéneas, con menor dispersión de la luz, mientras que la celulosa (polímero de mayor tamaño) genera estructuras más heterogéneas que incrementan la dispersión, dando lugar a materiales translúcidos.

Por otro lado, diversos estudios han evidenciado que la incorporación de refuerzos lignocelulósicos afecta negativamente la transparencia de las películas. Srivastava et al. (2023) observaron que una mayor carga de fibra aumenta la rugosidad de la superficie, lo que favorece

la dispersión de la luz y, en consecuencia, reduce la transparencia del material. Esto explica los hallazgos reportados por Collazo-Bigliardi et al. (2018), quienes evidenciaron que la incorporación de fibras de cascarilla de arroz reduce la transmitancia interna de las películas, indicando menor transparencia. Asimismo, Collazo-Bigliardi et al. (2019) señalaron que la incorporación de fibras y extractos derivados de esta biomasa da lugar a materiales menos transparentes y con tonalidades marrones.

Figura 6

Transparencia en películas de alcohol polivinílico con celulosa y nanocelulosa



Nota. PVA/CE: alcohol polivinílico y celulosa; PVA/NC: alcohol polivinílico y nanocelulosa. Adaptado de Cholant et al. (2025).

Esta reducción en la transparencia puede considerarse una limitación desde el punto de vista óptico y una desventaja en comparación a plásticos convencionales como el LDPE que tienen buena transparencia (Piergiovanni y Limbo, 2016). Sin embargo, esta característica de las biopelículas resulta funcionalmente relevante en aplicaciones de envasado, ya que puede contribuir a la protección de los alimentos frente a reacciones de oxidación inducidas por la luz,

efecto que podría verse reforzado por la actividad antioxidante de los compuestos presentes en el extracto de cascarilla de arroz (Collazo-Bigliardi et al., 2018; Collazo-Bigliardi et al., 2019).

Aplicación del material en el envasado de alimentos

La validación funcional del material obtenido es un paso crítico para determinar su eficiencia como sistema de empaque. Esta fase experimental permite analizar las alteraciones fisicoquímicas y microbiológicas que experimenta el alimento hasta llegar a la senescencia, permitiendo comparar el desempeño de los envases biodegradables frente a los envases convencionales derivados del petróleo. Para el análisis, se seleccionaron frutos no climatéricos con una vida útil corta, como lo son las fresas y las uvas.

Guamán (2022) evaluó la vida útil de uvas (*Vitis vinífera*) almacenadas a temperatura ambiente bajo tres condiciones: envasadas en el bioplástico elaborado a base de almidón de triticale y cascarilla de arroz (Muestra 1), envasadas en plástico sintético de origen fósil (Muestra 2) y como control, uvas sin empaque (Muestra 3). Los resultados evidenciaron que en el día 16 se observó moho en la Muestra 3, el día 18 la Muestra 2 presentó moho en el raspón (rama que mantiene unido a las uvas) (Figura 7). El día 20 se observó deterioro en las uvas de las Muestras 1 y 2, mientras que ese mismo día, la muestra 3 presentaba olor agrio, mohos y descomposición avanzada como se observa en la Figura 8. Este resultado demuestra que el bioplástico reforzado con cascarilla de arroz (Muestra 1) cumple con la función de proteger y garantizar la vida útil del alimento, ofreciendo resultados similares al plástico convencional en cuanto a la conservación.

Figura 7

Empacado de uvas almacenadas al ambiente día 18



Nota. Uvas envasadas en bandeja de icopor, biofilm de almidón de triticale y cascarilla de arroz, plástico sintético y sin plástico. Adaptado de Guamán (2022).

Figura 8

Empacado de uvas almacenadas al ambiente día 20



Nota. Estado de las uvas después de 20 días de almacenamiento. Adaptado de Guamán (2022).

Guamán (2022) también evaluó la vida útil de uvas (*Vitis vinífera*) almacenadas en refrigeración a una temperatura de 4°C, manteniendo las mismas condiciones de envase para las tres muestras. Los resultados evidenciaron que a partir del día 24, la piel de las uvas de la Muestra 3 presentó arrugamiento, exponiendo deshidratación (Figura 9). El día 28 se retiró los plásticos de las Muestras 1 y 2, se observó que la Muestra 1 estaba arrugada, indicando que empezó un proceso de deshidratación; la Muestra 2 reflejó presencia de moho en el raspón de las

uvas como se evidencia en la Figura 10. Este resultado indica que la biopelícula desarrollada inhibe el crecimiento microbiano.

Figura 9

Empacado de uvas almacenadas en refrigeración día 24



Nota. Uvas refrigeradas envasadas en bandeja de icopor, biofilm de almidón de triticale y cascarilla de arroz, plástico sintético y sin plástico. Adaptado de Guamán (2022).

Figura 10

Empacado de uvas almacenadas en refrigeración día 28



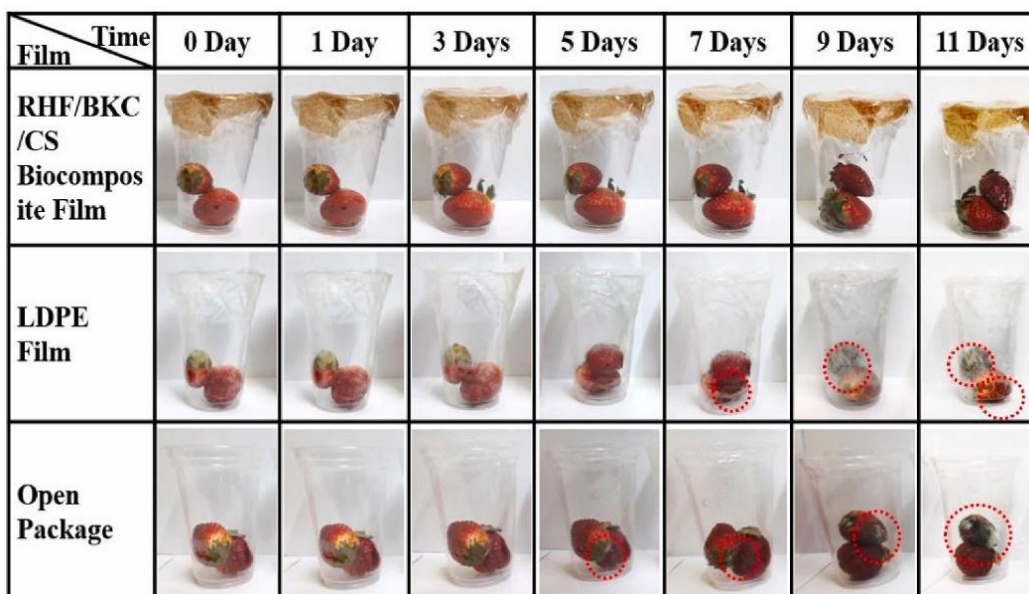
Nota. Estado de las uvas después de 28 días de almacenamiento en condiciones de refrigeración. Adaptado de Guamán (2022).

Por otro lado, Srivastava et al. (2023) analizaron el comportamiento de fresas envasadas bajo tres condiciones: biopelícula a base de almidón con fibra de cascarilla de arroz (Muestra 1), envase plástico convencional sellado (Muestra 2) y envase plástico convencional abierto

(Muestra 3), las tres muestras se almacenaron en una cámara ambiental a $25 \pm 5^\circ\text{C}$ y 50% de humedad relativa. La Muestra 3 presentó crecimiento microbiano al quinto día, seguido por la Muestra 2 al séptimo día. El día 11 se observó deterioro en las fresas de la Muestra 1, mostrando que la película desarrollada no solo actuó como barrera física, sino que inhibió el crecimiento y la proliferación de microorganismos, prolongando significativamente la vida útil de las fresas envasadas tal como se observa en la Figura 11.

Figura 11

Comparación del crecimiento microbiano en fresas en envase abierto, de ldpe y de biocompuesto RHF/BKC/CS.



Nota. Comparación por día de fresas almacenadas con diferentes films. Adaptado de Srivastava et al. (2023).

A pesar de las diferencias en la formulación de los materiales, los hallazgos de ambos autores confirman el alto potencial de la cascarilla de arroz como refuerzo en matrices biobasadas. Las películas evaluadas lograron extender la vida útil de las frutas frente a las

muestras de control no empacadas o no selladas, siendo una excelente alternativa técnicamente viable para la industria del envasado sostenible, con resultados de desempeño comparables a los obtenidos en las muestras envasadas en plásticos convencionales de origen fósil.

Biodegradabilidad en suelo

La característica que comparten los materiales analizados en esta revisión es su origen biológico, lo cual, según su composición química, les confiere una naturaleza biodegradable. Esta propiedad permite su descomposición acelerada por la actividad biológica (Ramírez, 2023; Piergiovanni y Limbo, 2016), mitigando el impacto ambiental derivado del uso de materiales de origen fósil (Montenegro, 2020; Parra Pérez, 2019; Robertson, 2013). Esta característica es de gran interés a nivel industrial, ya que se alinea con las estrategias de producción y consumo sostenible (Belda, 2018; Romero-Sáenz, 2022). En este contexto, se presentan los hallazgos reportados por diversos autores en pruebas de degradación, que evalúan el deterioro mecánico y estructural del envase; y de biodegradación, donde la actividad microbiana transforma los polímeros en agua, dióxido de carbono o biomasa (Piergiovanni y Limbo, 2016; Robertson, 2013).

Respecto al ensayo de biodegradabilidad, según Piñeros y Sierra (2018) la película alcanzó un porcentaje de biodegradación de 70,7% en un tiempo de 24 días y produjo 0,040g de CO_2 , lo cual indica que los polímeros a base de TPS y cáscara de arroz son fácilmente biodegradados por microorganismos aerobios en condiciones de compostaje en un periodo menor a 90 días, cumpliendo con la normatividad internacional de biodegradación establecida en la norma ASTM D5338.

Otros autores realizaron pruebas enfocadas a analizar la degradación física de los materiales obtenidos, como Cholant et al. (2025) que evaluaron la degradabilidad de las películas

en función de la pérdida de masa a intervalos de 0 a 60 días de enterramiento en el suelo. Los resultados indicaron que la incorporación de nanocelulosa permitió mayor resistencia durante los primeros 45 días, sin embargo, alcanzó una pérdida de masa del 100% antes de los 60 días, superando significativamente los materiales de embalaje convencionales. El uso de nanocelulosa extraída de la cáscara de arroz no solo optimiza las propiedades mecánicas y de barrera del material, sino que también mejora su cinética de degradación, otorgando una mayor durabilidad funcional a la película durante su vida útil, sin comprometer su biodegradabilidad final. Por otro lado, Guamán (2022) determinó la desintegración en suelo dejando la película a diferentes condiciones atmosféricas y riego periódico. La película fue perdiendo su estructura y a partir del día 72, se evidenció la biodesintegración por parte de los microorganismos de la tierra, alcanzando una degradación de más del 50% en 90 días. Srivastava et al. (2023) observaron una rápida desintegración física de las películas, las cuales perdieron su forma definida y peso, logrando desintegrarse en 30 días. Aunque los estudios citados se enfocan en la desintegración física de los materiales, los resultados observados y su composición a base de biopolímeros sugiere que estos también cumplirían satisfactoriamente los criterios de biodegradación.

El desarrollo de biopelículas y bioempaques es una alternativa prometedora para la industria del envasado sostenible. Los resultados de las investigaciones confirman que los materiales preservan su integridad estructural durante las etapas de empaque, almacenamiento y comercialización, garantizando la seguridad y vida útil del alimento, pero una vez ha cumplida su función técnica, su naturaleza biológica asegura una biodegradación final eficiente, cerrando de forma óptima el ciclo de vida del producto.

Comparación del potencial de la cascarilla de arroz frente a otros residuos agroindustriales en aplicaciones de envasado

A diferencia de otros residuos agroindustriales, cuya disponibilidad está condicionada por los periodos de cosecha y por una vida útil limitada, la cascarilla de arroz presenta una disponibilidad constante. Esto se debe al almacenamiento prolongado del arroz paddy, el cual se procesa en los molinos según la demanda del mercado, lo que confiere a este residuo una ventaja relevante para su aprovechamiento industrial.

En relación con el aprovechamiento del almidón, la cascarilla de arroz no se posiciona como la fuente más importante, ya que otros residuos como las cáscaras de yuca y de papa presentan contenidos superiores de este biopolímero (Weligama Thuppahige et al., 2023). Sin embargo, su potencial no radica principalmente en este componente, sino en su contenido de celulosa, el cual resulta determinante para la formación de matrices poliméricas estables y homogéneas.

La celulosa juega un papel fundamental en la fabricación de biopelículas y otros materiales para el envasado de alimentos. La eficiencia en la obtención de este biopolímero está directamente relacionada con su concentración en la materia prima, como se observa en la Tabla 8, la cascarilla de arroz tiene un contenido de celulosa del 35–40 % que supera significativamente a residuos como el bagazo de cerveza, garantizando un mayor rendimiento en los procesos de extracción y purificación. Por otra parte, residuos como la cáscara de cacao y la cascarilla de maíz presentan valores de celulosa similares, lo que permite obtener resultados comparables en aplicaciones de envasado, tal como lo evidencian los estudios de Qamar et al. (2025) y Ratna et al. (2022). Si bien otros materiales lignocelulósicos, como las hojas de piña y ciertas fibras naturales, presentan contenidos más elevados de celulosa, la combinación entre

disponibilidad, volumen generado y contenido suficiente de este biopolímero posiciona a la cascarilla de arroz como un subproducto con alto potencial de aprovechamiento para la elaboración de biopelículas estables y homogéneas.

Tabla 8

Comparación del contenido de celulosa de diferentes residuos agroindustriales.

Residuo agroindustrial	Contenido de celulosa (%)	Referencia (Autor, Año)
Cascarilla de arroz	35 – 40	(Diaz, 2019; Gao et al., 2018; Montenegro, 2020)
Cáscara de paja de maíz	31,67	(Zhang et al., 2024, como se citó en Jafarzadeh et al., 2025)
Cáscara de maíz	31-39	(Ratna et al., 2022)
Cáscara de cacao	~42	(Qamar et al., 2025)
Bagazo de cerveza	16–21	(Oztuna Taner et al., 2023)
Hoja de piña	74,44	(Ratna et al., 2022)

Nota. Los valores reportados pueden tener variaciones según el origen del residuo y las condiciones de cosecha.

Uno de los derivados más ampliamente utilizados de la celulosa en aplicaciones de envasado es la carboximetilcelulosa (CMC) (Robertson, 2013). Al comparar el rendimiento de obtención de este biopolímero a partir de distintos residuos agroindustriales, se observa que la cáscara de cacao y el bagazo de caña de azúcar presentan una mayor eficiencia frente a la

cascarilla de arroz (Tabla 9). Esta diferencia puede atribuirse a la naturaleza química de la cascarilla de arroz, que favorece la formación de subproductos secundarios durante la reacción de carboximetilación, lo cual disminuye la pureza del producto final y su grado de sustitución (DS). En consecuencia, la CMC obtenida a partir de cascarilla de arroz presenta un DS de 0,53, lo que se traduce en una menor solubilidad y en una capacidad reducida para formar redes poliméricas altamente uniformes, en comparación con la CMC derivada del cacao y del bagazo de caña de azúcar (Gupta et al., 2019; Qamar et al., 2025).

Tabla 9

Rendimiento en la obtención de CMC a partir de diferentes residuos agroindustriales.

Subproducto	Rendimiento extracción CMC (g/g)	Grado de sustitución
Cáscara de arroz	0,8933 g/g	0,53
Cáscara de cacao	1,385 g/g	0,71
Bagazo de caña de azúcar	0,9457 g/g	0,65

Nota. Datos tomados de Gupta et al. (2019) y Oztuna Taner et al. (2023).

Desde el punto de vista mecánico, las películas elaboradas con CMC de bagazo de caña de azúcar presentan valores superiores de resistencia a la tracción (16,03 MPa) y alargamiento a la rotura (18,97 %) en comparación con las películas producidas con CMC derivada de cáscara de arroz (12,72 MPa y 12,69 %, respectivamente) (Gupta et al., 2019). Esto sugiere que la CMC obtenida de la cascarilla de arroz confiere al material un comportamiento más rígido y quebradizo. No obstante, al compararla con biopelículas formuladas con CMC de bagazo de cerveza, la CMC de arroz destaca por una mayor resistencia a la tracción (12,72 MPa frente a 5,36 MPa) (Oztuna Taner et al., 2023), lo que respalda su potencial para la obtención de

materiales con mejor integridad estructural y mayor resistencia al daño mecánico por compresión. Sin embargo, su menor ductilidad, evidenciada por el bajo alargamiento a la rotura, indica que estas películas podrían fracturarse con mayor facilidad ante esfuerzos de deformación.

Al comparar los resultados de Collazo-Bigliardi et al. (2018) quien uso la misma matriz de almidón y comparo los resultados obtenidos con las matrices reforzadas con fibras de celulosa de cascara de arroz y de cascara de café, se encuentra que las dos fibras provocaron un efecto reforzante relevante en la película, sin embargo, la cascara de café mantuvo ligeramente una mejor la ductilidad que la de arroz, dando lugar a películas ligeramente más frágiles al momento de la rotura.

Respecto a la aplicación en el envasado de alimentos frescos, Srivastava et al. (2023) demostraron que las películas reforzadas con fibras de cascarilla de arroz son efectivas en la inhibición microbiana y en la mejora de la apariencia de fresas durante el almacenamiento. No obstante, la ausencia de una caracterización más completa de parámetros de calidad del fruto, como la preservación de compuestos como antocianinas o la pérdida de peso, evidencia la oportunidad de profundizar en estos aspectos. Mientras que estudios realizados con biopelículas reforzadas con el bagazo de cerveza ya han validado la preservación de antocianinas y la reducción de pérdida de peso (Oztuna Taner et al., 2023) y, por lo tanto, evidencian que la evaluación integral de estos parámetros fisicoquímicos en películas derivadas de cascarilla de arroz resulta clave para determinar su competitividad en la preservación de la frescura y en la prevención de procesos oxidativos en los productos.

Desde otro enfoque, la incorporación de la cascarilla de arroz como material de refuerzo en bandejas biodegradables ha mostrado resultados prometedores, según Mena-Chacon et al. (2025) la adición de fibras de celulosa de cáscara de arroz mejoró significativamente la dureza y

la resistencia a la tracción de bandejas elaboradas con almidón de semilla de patata y aguacate. En particular, la incorporación de un 14 % de fibra permitió alcanzar valores de dureza superiores a 40 N y una resistencia mecánica mayor a 0,15 MPa. Mientras que los resultados óptimos de bandejas biodegradables a base de almidón de yuca reforzadas con fibra de ceiba y cacao registraron una dureza de 40 N para las bandejas con fibras de ceiba, mientras que las que tenían fibras de cacao mostraron una resistencia mecánica 0,4 MPa (Quispe-Sánchez et al., 2025) y superan los valores obtenidos en la dureza de bandejas biodegradables reforzadas con harina de cáscara de maíz, que oscilaron entre 12,56 y 23,95 N (Aguirre et al., 2023).

Estos resultados concuerdan con el aumento observado de hasta un 22,5 % en la resistencia a la tracción (MPa) cuando se utiliza cáscara de arroz como material de relleno en matrices de polietileno de alta densidad (Mena-Chacon et al., 2025), lo que resalta su potencial como refuerzo estructural frente a otros residuos agroindustriales.

En conjunto, estos resultados evidencian que no es posible catalogar a la cascarilla de arroz como mejor materia prima que otra, ya que su desempeño depende de la pureza de los biopolímeros extraídos, la interacción con la matriz polimérica y las propiedades mecánicas o funcionales obtenidas. Sin embargo, su alta disponibilidad, su adecuado contenido de celulosa y su versatilidad como material de refuerzo la posicionan como un subproducto con alto potencial para el desarrollo de biopelículas y otros materiales innovadores para el envasado de alimentos (Romão et al., 2022).

No obstante, a nivel general la producción de bioplásticos a partir de subproductos y residuos agroindustriales presentan limitaciones económicas asociadas a los altos costos operativos, relacionadas a que los procesos actuales de extracción, procesamiento y modificación de estos residuos para obtener compuestos de interés, como almidón o fibras, suelen requerir

mucha energía. Además, frente a las alternativas convencionales de gestión de residuos, que cuentan con una infraestructura consolidada para el reciclaje y el compostaje, las hace alternativas de aprovechamiento menos competitivas económicamente (Jafarzadeh et al., 2025; Lackner et al., 2023).

Finalmente, como resultado de este trabajo se resalta el potencial de la cascarilla de arroz y se fomenta el desarrollo de estudios experimentales orientados al aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima para la obtención de biopolímeros y compuestos bioactivos capaces de minimizar el uso de materiales sintéticos tradicionales y mitigar el impacto ambiental asociado a los residuos agroindustriales.

Conclusiones

La cascarilla de arroz está compuesta principalmente por fibra lignocelulósica y cenizas, con una menor proporción de proteínas y almidón; diversos estudios resaltan el potencial de aprovechamiento de biopolímeros basados en polisacáridos como la celulosa, sea en forma de fibra o derivados, debido a sus propiedades estructurales fundamentales para la síntesis de materiales aplicados al envasado de alimentos.

Las aplicaciones de este subproducto en el desarrollo de materiales para envasado comprenden la síntesis de bioplásticos, la obtención de biopelículas y la elaboración de envases biodegradables, una tendencia predominante es la formulación de materiales compuestos, integrando la cascarilla de arroz con matrices poliméricas y aditivos para mejorar el desempeño funcional de los envases para alimentos.

La caracterización tecnológica de los materiales reforzados con derivados de la cascarilla de arroz demuestra que su desempeño mecánico es óptimo para el desarrollo de biopelículas flexibles o capas funcionales en envases multicapa. Su aplicación en la elaboración de envases rígidos es limitada, debido a que no ofrecen buena protección al daño mecánico como los envases rígidos convencionales. En cuanto a las propiedades de barrera, las biopelículas exhiben una alta eficiencia como barrera al oxígeno y una deficiente barrera al vapor de agua, característica de las matrices hidrofílicas reforzadas con celulosa.

A nivel óptico, la adición de fibras de celulosa confiere una apariencia traslúcida a las biopelículas, mientras que la nanocelulosa, gracias a su escala nanométrica minimiza la dispersión de luz, generando materiales transparentes ideales para el envasado de alimentos. La incorporación de compuestos antioxidantes de la cascarilla de arroz, combinado con su

apariencia translúcida, confiere a estas biopelículas un alto potencial como envase activo, al proteger de la oxidación y mejorar la apariencia del alimento.

El análisis de las pruebas de vida útil en alimentos frescos demuestra su capacidad para inhibir la proliferación microbiana, alcanzando tiempos de conservación comparables con empaques plásticos de origen fósil. Asimismo, las pruebas de biodegradabilidad demuestran que estas biopelículas preservan su integridad estructural y la seguridad alimentaria durante su uso, al mismo tiempo que garantizan una biodegradación final eficiente, lo que valida la reintegración del envase al ciclo natural y confirma un equilibrio óptimo entre funcionalidad y sostenibilidad.

Finalmente, el desempeño de la cascarilla de arroz frente a otros subproductos agroindustriales depende de la pureza de los biopolímeros extraídos y su interacción con la matriz. Sin embargo, su elevado contenido de celulosa y compuestos bioactivos, sumado a su amplia disponibilidad en el departamento del Meta, la consolidan como una materia prima competitiva y con alto potencial para el desarrollo de biopelículas funcionales. Así, su aprovechamiento no solo representa una innovación en el envasado de alimentos, sino también una oportunidad clave para mitigar el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos y fortalecer la bioeconomía regional.

Recomendaciones

Se recomienda orientar futuras investigaciones hacia la optimización de los métodos de extracción de compuestos de interés obtenidos de la cascarilla de arroz, con el fin de mejorar su eficiencia, reducir costos y facilitar su aplicación a escala industrial. Asimismo, es necesario profundizar en el desarrollo y estandarización de procesos de obtención de biopelículas que garanticen reproducibilidad y un desempeño funcional consistente, contribuyendo a la prolongación de la vida útil de los alimentos.

De igual forma, se considera pertinente ampliar las investigaciones en el contexto nacional, especialmente en el departamento del Meta, donde existe disponibilidad del residuo, pero limitada evidencia experimental sobre su aprovechamiento en aplicaciones para el envasado de alimentos.

Finalmente, se recomienda fortalecer la articulación entre la academia, el sector productivo y las instituciones públicas, con el propósito de transferir el conocimiento generado y promover el desarrollo de biomateriales a partir de residuos agroindustriales para el envasado de alimentos.

Referencias bibliográficas

- Acevedo, M. A., Castrillo, W. A. & Belmonte, U. C. (2006). Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*, 56(2), 151-170.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000200001
- Aguilar, S., Espín, D. & Uzca, C. (2019). *Producción y caracterización de un biopolímero obtenido a partir de residuos agroindustriales del cacao (CCN-51)*. [Trabajo de grado, Universidad de Guayaquil]. Dialnet.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9499484>
- Aguirre, E., Domínguez, J., Villanueva, E., Ponce-Ramirez, J. A., de Fátima Arevalo-Oliva, M., Siche, R., González-Cabeza, J., & Rodríguez, G. (2023). Biodegradable trays based on Manihot esculenta Crantz starch and Zea mays husk flour. *Food Packaging and Shelf Life*, 38(101129), 101129. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101129>
- Alves, V. D., Mali, S. y Grossmann, M. V. E. (2007). Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 941–946.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.007>
- Arega, A. S., Tsigkou, K., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2026). Sustainable valorization of coffee pulp: Evaluation of the pretreatment effect on the phenolic compounds recovery and anaerobic digestion of the residual biomass. *Biomass & Bioenergy*, 209(108969), 108969. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.108969>
- Ashby, M. F., Shercliff, H., y Cebon, D. (2007). *Materials: Engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F., Shercliff, H., y Cebon, D. (2007). *Materials: Engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann.

- Asociación Española de Normalización. (2001). *Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación (UNE-EN 13432:2001)*.
- ASTM International. (2015). *ASTM D5338-15: Standard test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM D882-18: Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting*. ASTM International.
- Ayala, J. C. L., Vinueza, X. R. C., Cárdenas, G. O. Z., & Marcillo, W. F. C. (2021). La economía circular de los desechos generados por la gramínea de arroz frente al efecto ambiental. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(3), 874-900.
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2411>
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos* (4.^a ed.). Pearson Educación.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99(1), 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>
- Belda Hériz, I. (2018). *Economía circular: Un nuevo modelo de producción y consumo sostenible*. Editorial Tébar Flores. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/lc/unad/titulos/51998>
- Bernal Aguilar, J., Brausin Rodríguez, B. y Gutiérrez Rodríguez, J. (2018). *Elaboración de teja tipo S con compósitos de matriz cementicia adicionada con cascarilla de arroz en la ciudad de Villavicencio* [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/4230>

- Blanco Redondo, M. E., Arango Hernández, A. L., Tyler, N., Borgford Parnell, N., Wilmsmeier, G., Cannon, C., Lal, R. L., & Fullerton, J. (2025). *Reseñas producción y consumo sostenible-VII Congreso Internacional de medio ambiente “Iniciativas de desarrollo Sostenible: Rol del sector empresarial y financiero.”* Universidad El Bosque.
<https://repositorio.unbosque.edu.co/items/5a639af7-607d-4a57-94f3-0902e41a987c>
- Boey, J. Y., Lee, C. K., y Tay, G. S. (2022). Factors affecting mechanical properties of reinforced bioplastics: A review. *Polymers*, 14(18), 3737.
<https://doi.org/10.3390/polym14183737>
- Bustamante-Bernedo, M. S., Gomez, E. D., & Huamán-Castilla, N. L. (2025). Polyphenols from rice husk: A review of emerging extraction techniques and potential applications. *Food Chemistry Advances*, 9(101182), 101182. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101182>
- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Carrillo Inungaray, M. L., & Reyes Munguía, A. (2014). Vida útil de los alimentos / Lifetime food. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 2(3), 32. <https://doi.org/10.23913/ciba.v2i3.20>
- Castro, H., Contreras, E. J. y Rodríguez, J. P. (2020). Análisis ambiental: Impactos generados por los residuos agrícolas en el municipio de El Dorado (Meta, Colombia). *Revista ESPACIOS*, 41(38), 53–64. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n38p05>
- Chawla, R., Sivakumar, S., & Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements- a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024.
<https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100024>

- Cholant, G. M., Bosenbecker, M. W., Reichert, A. A., Beatrice, C. A. G., Freitas, T. C., Freitas, N. D., de Nunes, N. V. V., Galio, A. F., Missio, A. L., & de Oliveira, A. D. (2025). Polyvinyl alcohol films reinforced with nanocellulose from rice husk. *Macromol*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/macromol5010006>
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Chiralt Boix, A. (2018). Reinforcement of thermoplastic starch films with cellulose fibres obtained from rice and coffee husks. *Journal of Renewable Materials*, 6(7), 599–610. <https://doi.org/10.32604/jrm.2018.00127>
- Collazo-Bigliardi, Sofía, Ortega-Toro, R., & Chiralt, A. (2019). Improving properties of thermoplastic starch films by incorporating active extracts and cellulose fibres isolated from rice or coffee husk. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, Artículo 100383. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100383>
- Congreso de la República de Colombia. (1979). *Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan medidas sanitarias*. Diario Oficial No. 35.308. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1177>
- Congreso de la República de Colombia. (2022). *Ley 2232 de 2022. Por la cual se establecen medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y el consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 52.088. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2232-de-2022/>
- Conza, C. (2020). *Estudio de la obtención de biopelículas a partir de residuos agroindustriales para empaquetado de alimentos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas* [Tesis de grado, Universidad Técnica Particular de Loja]. https://dspace.utpl.edu.ec/visorHub/?handle=20.500.11962_28568

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Federación Nacional de Arroceros, & Fondo Nacional del Arroz. (2023). *Boletín técnico: Quinto Censo Nacional Arrocerero. Primera entrega (resultados departamentales)*.

<https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CNA/bol-5toCNA-2023.pdf#page=2.18>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Federación Nacional de Arroceros, & Fondo Nacional del Arroz. (2025). *Boletín técnico: Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM). Segundo semestre de 2025*.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-arroz-mecanizado>

Díaz Tovar, D. (2019). *Usos potenciales de cascarilla de arroz en el departamento de Casanare* [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional

UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/30131>

Dirección de Información Agraria. (2011). *Boletín informativo: Cultivo de arroz*. Gobierno Regional de Loreto. [https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-loreto/archivos/public/docs/353.pdf)

[loreto/archivos/public/docs/353.pdf](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-loreto/archivos/public/docs/353.pdf)

Ferrer Cutanda, S. (2018). *Obtención de fibras de celulosa de cascarilla de arroz y café e incorporación a films de almidón termoplástico* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Universidad Politécnica de Valencia.

<https://riunet.upv.es/handle/10251/107306>

Franco, S., Matías, N., Tavárez, J., Peña, M. E., Reynoso, B. y Marín, W. (2023). Evaluación de propiedades físicas de películas plásticas biodegradables elaborados utilizando una combinación de subproductos de arroz (*Oryza sativa*) y yuca (*Manihot esculenta*).

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(2), 11735–11747.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.7614

Gao, Y., Guo, X., Liu, Y., Fang, Z., Zhang, M., Zhang, R., ... & Liu, R. H. (2018). A full utilization of rice husk to evaluate phytochemical bioactivities and prepare cellulose nanocrystals. *Scientific reports*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27635-3>

Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Entezami, A. A. (2011). Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 229–235.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.016>

Guamán Sagñay, J. (2022). *Obtención de bioplásticos a partir del almidón de triticale y de cascarilla de arroz para su aplicación como empaque de alimentos* [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/17385>

Gupta, H., Kumar, H., Kumar, M., Gehlaut, A. K., Gaur, A., Sachan, S., & Park, J.-W. (2019). Synthesis of biodegradable films obtained from rice husk and sugarcane bagasse to be used as food packaging material. *Environmental Engineering Research*, 25(4), 506–514.

<https://doi.org/10.4491/eer.2019.191>

Han, J. H. (Ed.). (2013). *Innovations in food packaging* (2.^a ed.). Academic Press.

Hernández-Sampieri, R. y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill. <https://www-ebooks7-24-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/?il=6443>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] (2022). *Plásticos*.

Contenido biobasado. Parte 1: Principios generales (NTC-ISO 16620-1). ICONTEC.

- Jafarzadeh, S., Qazanfarzadeh, Z., Parandi, E., Esmaeili, Y., Barrow, C. J., Timms, W., & Naebe, M. (2025). Eco-friendly plastics from cereal-derived by-products and waste: A circular economy approach for sustainable packaging. *Materials Today. Chemistry*, 47(102782), 102782. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2025.102782>
- Kargarzadeh, H., Johar, N., & Ahmad, I. (2017). Starch biocomposite film reinforced by multiscale rice husk fiber. *Composites Science and Technology*, 151, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.08.018>
- Kusuma, H. S., Sabita, A., Putri, N. A., Azliza, N., Illiyanasafa, N., Darmokoesoemo, H., Amenaghawon, A. N., & Kurniawan, T. A. (2024). Waste to wealth: Polyhydroxyalkanoates (PHA) production from food waste for a sustainable packaging paradigm. *Food Chemistry. Molecular Sciences*, 9, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2024.100225>
- Lackner, M., Mukherjee, A., & Koller, M. (2023). What are "bioplastics"? Defining renewability, biosynthesis, biodegradability, and biocompatibility. *Polymers*, 15(24), 4695. <https://doi.org/10.3390/polym15244695>
- Leite, P., Sousa, D., Fernandes, H., Ferreira, M., Costa, A., Filipe, D., Goncalvez, M., Peres, H., Belo, I. & Salgado, J. (2021). Recent advances in production of lignocellulolytic enzymes by solid-state fermentation of agroindustrial wastes. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 27, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100407>
- Mafla B., A. (2009). Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción. *INVENTUM*, 4(6). <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.4.6.2009.74-78>
- Mena-Chacon, L. M., Quispe-Sanchez, L., Chicana, F., Oblitas, R., Huaman-Pilco, A. F., Mori, S., Oliva, M., & Yoplac, I. (2025). Biopolymers extracted from agro-industrial wastes of

- lucuma, avocado and rice for production of biodegradable trays. *Journal of Agriculture and Food Research*, 23(102231), 102231. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102231>
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca – MAGP. (2019). *Informe de rendimientos objetivos de arroz en cáscara*. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/rendimientos-de-arroz-2019>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2005). *Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Diario Oficial No. 46.137. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2012). *Resolución 683 de 2012. Por la cual se expide el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano*. Diario Oficial No. 48.388. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-0683-de-2012.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). *Resolución 2674 de 2013. Por la cual se reglamenta el artículo 126 del Decreto Ley 019 de 2012 y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 48.862. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-2674-de-2013.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile (s. f). *Residuos orgánicos. Economía circular*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/residuos-organicos/>

- Montenegro, R. E. (2020). *Aprovechamiento de la cáscara de arroz para la producción de bioplásticos* [Tesis de grado, Universidad de Cádiz]. Repositorio de Objetos de Docencia e Investigación de la Universidad de Cádiz. <http://hdl.handle.net/10498/23513>
- Navia Porras, D. (2015). *Desarrollo de un material para empaques de alimentos a partir de harina de yuca y fibra de fique* [Tesis de maestría, Universidad del Valle]. Repositorio Institucional Universidad del Valle. <https://hdl.handle.net/10893/8845>
- Nuncira-Negrete, C. A. (2023). Modelo de gestión del residuo de cascarilla mediante cogeneración en pymes arroceras, un estudio de caso. *Producción Más Limpia*, 18(1), 9–20. <https://doi.org/10.22507/pml.v18n1a1>
- Organización de las Naciones Unidas (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible: Agenda 2030*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- Ortega Ramírez, A., & Quispe Trinidad, M. (2021). Alternativas del uso de la cascarilla de arroz como fuente energética. *Revista Fuentes, El Reventón Energético*, 19(2), 69–81. <https://doi.org/10.18273/revfue.v19n2-2021005>
- Osorio Aguirre, L. (2019). *Análisis técnico económico para el uso de la cascarilla de arroz en la generación de energía eléctrica a partir del proceso de gasificación. Caso de estudio: molino de arroz Pacande de la ciudad de Villavicencio–Meta*. [Trabajo de grado, Universidad Libre]. Repositorio Institucional Unilibre. <https://hdl.handle.net/10901/18602>.
- Ospina Arias, J. (2013). *Fundamentos de envases y embalajes*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/2526/fundamentos_envases_embalajes.pdf

- Oztuna Taner, O., Ekici, L., & Akyuz, L. (2023). CMC-based edible coating composite films from Brewer's spent grain waste: a novel approach for the fresh strawberry package. *Polymer Bulletin (Berlin, Germany)*, 80(8), 9033–9058.
<https://doi.org/10.1007/s00289-022-04490-x>
- Parra Pérez, J. B. (2019). *Obtención de biofilm a partir del almidón de Zanahoria Blanca (Arracacia xanthorrhiza) y de Camote (Ipomoea batatas) como alternativa al uso de material plástico derivado de petróleo* [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Digital ESPOCH.
<https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/13808>
- Peñaranda González, L. V., Montenegro Gómez, S. P., & Giraldo Abad, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(2), 141-150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Pérez, G. C. (2010). *Evaluación del uso de la cascarilla de arroz como agregado orgánico en morteros de mampostería* [Trabajo de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis/08_3173_C.pdf
- Piergiovanni, L., y Limbo, S. (2016). *Food packaging materials*. Springer.
- Pincioli, M. (2011). *Proteínas de arroz: Propiedades estructurales y funcionales* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio institucional.
https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1828/Documento_completo_.pdf?sequence=3
- Piñeros Guerrero, N. D., & Sierra Barahona, F. D. (2018). *Películas biodegradables activas a base de almidón termoplástico y poli (ϵ -Caprolactona): Aplicación tecnológica de*

- extractos antioxidantes provenientes de cascarilla de arroz*. [Trabajo de grado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio institucional UTADDO.
<http://hdl.handle.net/20.500.12010/4280>
- Qamar, S. A., Piccolella, S., Ziegler, G. R., Pacifico, S., & Zhang, Y. (2025). Functional bioplastic films from cocoa shell cellulose and natural waxes: Toward sustainable active packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 52(101595), Not Available.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101595>
- Quispe-Sánchez, L., Chuquilín-Goicochea, R., Figueroa-Avalos, H. M., Chavez, S. G., Yoplac, I., Mori, S., Vigo, C. N., Hernandez-Diaz, E., Mena-Chacón, L. M., Siche, R., & Oliva-Cruz, M. (2025). Biodegradable trays of cassava starch reinforced with Ceiba, coffee and cocoa fibers: a sustainable alternative to plastics. *Applied Food Research*, 5(2), 101277.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101277>
- Ramírez, A., Tovar, M y Silva-Marrufo, O. (2024). Rice husk reuse as a sustainable energy alternative in Tolima, Colombia. *Sci Rep* 14, 10391. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60115-5>
- Ramírez, M. (2023). *Estrategias de innovación en la creación de nuevos productos a partir de los residuos y subproductos de las industrias alimentarias*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD.
<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/54794>
- Ratna, A. S., Ghosh, A., & Mukhopadhyay, S. (2022). Advances and prospects of corn husk as a sustainable material in composites and other technical applications. *Journal of Cleaner Production*, 371(133563), 133563. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133563>

- Riera, M. A., Maldonado, S., & Palma, R. R. (2018). Residuos agroindustriales generados en Ecuador para la elaboración de bioplásticos. *Revista ingeniería industrial*, 17(3), 227–246. <https://doi.org/10.22320/s07179103/2018.13>
- Robertson, G. L. (2013). *Food packaging: Principles and practice* (3.^a ed.). CRC Press. https://wowsooru.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/10/food_packaging_-_principles_and_practice-1.pdf
- Romão, S., Bettencourt, A. y Ribeiro, I. A. C. (2022). Novel features of cellulose-based films as sustainable alternatives for food packaging. *Polymers*, 14(22), Artículo 4968. <https://doi.org/10.3390/polym14224968>
- Romero-Saéñz, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *Tecnológicas*, 25(54), 23. <https://www.redalyc.org/journal/3442/344271354013/html/>
- Srivastava, V., Singh, S., & Das, D. (2023). Rice husk fiber-reinforced starch antimicrobial biocomposite film for active food packaging. *Journal of Cleaner Production*, 421(138525), 138525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138525>
- Tenorio Quintero, L. A., & Martínez Fuentes, Y. A. (2019). *Desarrollo de un material compuesto a partir de la cascarilla de arroz (Oryza sativa) y harina de yuca (Manihot esculenta) como alternativa de aprovechamiento del subproducto arrocero*. [Tesis de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/12087>
- Torgbo, Selorm & Quan, Vo & Sukyai, Prakit. (2021). Cellulosic value-added products from sugarcane bagasse. *Cellulose*, 28(13), 8203–8230. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03918-3>

- Torres Giraldo, D. (2018). *Caracterización de la cascarilla de arroz y extracción de celulosa* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional uniandes.
<https://hdl.handle.net/1992/39503>
- Torres Jaramillo, D., Morales Vélez, S. P., & Quintero Díaz, J. C. (2017). Evaluación de pretratamientos químicos sobre materiales lignocelulósicos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 25(4), 733-743. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000400733>
- Trujillo, C. T. (2014). *Obtención de películas biodegradables a partir de almidón de yuca (manihot esculente crantz) doblemente modificado para uso en empaque de alimentos*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. Repositorio institucional UNAMAD. <https://repositorio.unamad.edu.pe/handle/20.500.14070/65>
- UDT - Universidad de Concepción. (23 de junio de 2022). *Bandejas compostables a partir de cascarilla de arroz, para el envasado de aves* [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=otq8nH9yIDk>
- Umbarila Gil, L. Á., Cásalas Rubiano, C. L., & Torres Sierra, S. F. (2024). *Desarrollo sostenible de envases biodegradables a partir de la cascarilla del arroz*. [Trabajo de grado, Universidad Escuela de Administración de Negocios]. Repositorio institucional EAN.
<http://hdl.handle.net/10882/13729>
- Universidad Nacional de Chimborazo. (2024). *Agroindustria. Residuos agroindustriales*. Universidad Nacional de Chimborazo. <https://doi.org/10.37135/u.editorial.05.115>
- Valencia García, J. S., Alfonso Cuervo, A. D. y González Pardo, R. D. P. (2025). Biodegradable packaging from rice husks: A sustainable solution for Villavicencio. *Environmental Research and Ecotoxicity*, (4).
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10143484>

- Vega, J. (2022). *Obtención de platos biodegradables a partir de cascarilla de arroz (Oryza sativa) y bagazo de caña (Saccharum officinarum)* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. ALICIA: Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNHE_3319a037a1b577d91059023398072c9a
- Wanyo, P., Meeso, N., & Siriamornpun, S. (2014). Effects of different treatments on the antioxidant properties and phenolic compounds of rice bran and rice husk. *Food Chemistry*, 157, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.061>
- Weligama Thuppahige, V. T., Moghaddam, L., Welsh, Z. G., Wang, T., & Karim, A. (2023). Investigation of critical properties of Cassava (*Manihot esculenta*) peel and bagasse as starch-rich fibrous agro-industrial wastes for biodegradable food packaging. *Food Chemistry*, 422(136200), 136200. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136200>
- Zambrano-Zambrano, G., García-Macías, V., Cedeño-Palacios, C. y Alcívar-Cedeño, U. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(4), 415-437. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7927005>

Apéndice A
Tablas complementarias y factores de conversión

Tabla A1

Valores reportados propiedades de barrera de las biopelículas usando la cascarilla de arroz

Referencia (Autor, año)	Permeabilidad Vapor de Agua (Unidad)	Permeabilidad al Oxígeno (Unidad)	Humedad (Unidad)
Guamán (2022)	$0,07 \frac{g \times mm}{h \times m^2 \times MPa}$	—	12,5 %
Piñeros y Sierra (2018)	$26,48 \frac{g}{h \times m^2 \times KPa}$	$6,7 \times 10^{15} \frac{cm^3}{m \times s \times Pa}$	—
Collazo-Bigliardi et al. (2018)	$11,5 \frac{g \times mm}{h \times m^2 \times KPa}$	$4,3 \times 10^{14} \frac{cm^3}{m \times s \times Pa}$	0,093 g/g ^a
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	$12,2 \frac{g \times mm}{h \times m^2 \times KPa}$	$2,1 \times 10^{14} \frac{cm^3}{m \times s \times Pa}$	—
Srivastava et al. (2023)	—	—	11,27 %

Nota. Se presentan los valores originales reportados por la literatura científica de las propiedades de barrera de las biopelículas.

Factores de conversión

Conversión del contenido de humedad de base seca a base húmeda ^a:

$$X_{bh} = \frac{X_{bs}}{1 + X_{bs}} = \frac{0,093}{1 + 0,093} = \frac{0,093}{1,093} \approx 0,0851 \times 100 = 8,51\% \quad (A1)$$

Conversión de permeabilidad al vapor de agua a unidades SI y finalmente Barrer:

$$0,07 \frac{g \text{ mm}}{h \text{ m}^2 \text{ MPa}} \rightarrow \frac{0,07 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 10^{-3} \text{ m}}{3600 \text{ s} \times 10^6 \text{ Pa}} \quad (\text{AII})$$

$$= \left(1,944 \times 10^{-17} \frac{\text{kg}}{\text{m s Pa}} \right) \times (1,659 \times 10^{17}) \approx 3,23 \text{ Barrer}$$

$$26,48 \frac{g}{h \text{ m}^2 \text{ KPa}} \rightarrow \frac{26,48 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 10^{-3} \text{ m}}{3600 \text{ s} \times 10^3 \text{ Pa}} \quad (\text{AIII})$$

$$= (7,356 \times 10^{-12}) \times (1,659 \times 10^{17}) \approx 1.220.285 \text{ Barrer}$$

$$11,5 \frac{g}{h \text{ m}^2 \text{ KPa}} \rightarrow \frac{11,5 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 10^{-3} \text{ m}}{3600 \text{ s} \times 10^3 \text{ Pa}} \quad (\text{AIV})$$

$$= (3,194 \times 10^{-12}) \times (1,659 \times 10^{17}) \approx 529.957 \text{ Barrer}$$

$$12,2 \frac{g}{h \text{ m}^2 \text{ KPa}} \rightarrow \frac{12,2 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 10^{-3} \text{ m}}{3600 \text{ s} \times 10^3 \text{ Pa}} \quad (\text{AV})$$

$$= (3,389 \times 10^{-12}) \times (1,659 \times 10^{17}) \approx 562.185 \text{ Barrer}$$

Conversión de permeabilidad al oxígeno a unidades SI y finalmente Barrer:

$$6,7 \times 10^{15} \frac{\text{cm}^3}{\text{m s Pa}} \rightarrow (6,7 \times 10^{15}) \times (1,333 \times 10^{13}) \approx 0,0893 \text{ Barrer} \quad (\text{AVI})$$

$$4,3 \times 10^{14} \frac{\text{cm}^3}{\text{m s Pa}} \rightarrow (4,3 \times 10^{14}) \times (1,333 \times 10^{13}) \approx 0,5732 \text{ Barrer} \quad (\text{AVII})$$

$$2,1 \times 10^{14} \frac{\text{cm}^3}{\text{m s Pa}} \rightarrow (2,1 \times 10^{14}) \times (1,333 \times 10^{13}) \approx 0,2800 \text{ Barrer} \quad (\text{AVIII})$$