



Artículo original / Original article

Efecto de la adición de carbón activado de coco de castaña en las propiedades de un biopolímero para el uso en empaques de alimentos - región Madre de Dios

Effect of Chestnut Shell Coconut-Activated Carbon Addition on the Properties of a Biopolymer for Food Packaging Applications - Madre de Dios Region

Yony Flora Fernández-Herrera ¹; Jesús Efraín Humpire-Castillo ¹

¹Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

Recibido: 18/04/2024

Aceptado: 20/06/2024

Publicado: 25/07/2024

*Autor de correspondencia: yfernandez@unamad.edu.pe

Resumen: Este estudio evaluó mezclas biodegradables de carbón activado de coco de castaña (CACC) y almidón de yuca (AY) en proporciones 5/95, 10/90 y 15/85, con el objetivo de desarrollar materiales sostenibles para empaques. Se caracterizaron sus propiedades fisicoquímicas, morfológicas, térmicas y mecánicas. El CACC mostró alta área superficial (400 m²/g) y poros de 3,0 nm, mientras que el AY destacó por su elasticidad y estabilidad térmica (>300 °C). Las mezclas presentaron mejoras hidrofílicas (solubilidad 35,20%, absorción 80,15%, permeabilidad 60,30%) con diferencias significativas ($p < 0,05$). La elasticidad alcanzó 450 MPa en la proporción 15/85. FTIR reveló interacciones químicas entre los componentes. Estos resultados demuestran la viabilidad de aprovechar residuos agrícolas como el CACC en materiales avanzados, promoviendo una economía circular en regiones como Madre de Dios. La combinación de propiedades térmicas, mecánicas e hidrofílicas posiciona a estas mezclas como alternativas prometedoras para aplicaciones industriales y ambientales.

Palabras clave: adsorción; almidón; biopolímero; empaques; residuos agroindustriales

Abstract: This study evaluated biodegradable blends of chestnut shell coconut-activated carbon (CACC) and cassava starch (CS) in ratios of 5/95, 10/90, and 15/85, aiming to develop sustainable materials for packaging. Their physicochemical, morphological, thermal, and mechanical properties were characterized. CACC exhibited a high surface area (400 m²/g) and an average pore size of 3.0 nm, while CS showed notable elasticity and thermal stability (>300 °C). The blends demonstrated improved hydrophilic properties – water solubility (35.20%), water absorption (80.15%), and vapor permeability (60.30%) – with statistically significant differences ($p < 0.05$). Elasticity reached 450 MPa in the 15/85 ratio. FTIR analysis revealed key chemical interactions between the components. These results confirm the feasibility of utilizing agricultural waste such as CACC in advanced materials, promoting a circular economy in regions like Madre de Dios. The combination of thermal, mechanical, and hydrophilic properties positions these blends as promising alternatives for industrial and environmental applications.

Keywords: adsorption; biopolymer; packaging; starch; agro-industrial waste

1. Introducción

El uso masivo de plásticos convencionales derivados del petróleo representa uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI. Estudios recientes han evidenciado que más del 95 % del valor económico de estos materiales se pierde tras un solo uso, generando una alarmante acumulación de residuos no biodegradables en los ecosistemas (Chen et al., 2021; Kaiser et al., 2020). Esta problemática se agudiza en zonas de alta biodiversidad como Madre de Dios, Perú, donde los impactos del plástico sobre la flora, fauna y recursos hídricos pueden ser irreversibles (Hu et al., 2023; Silva dos Santos et al., 2021).

Frente a este escenario, los biopolímeros han ganado atención como una alternativa sostenible debido a su origen renovable y biodegradabilidad. Entre ellos, el almidón de yuca (*Manihot esculenta*) destaca por su abundancia en regiones tropicales y sus propiedades de filmación, aunque su aplicación industrial está limitada por su alta higroscopicidad y baja resistencia térmica (Torres et al., 2019; Kwaśniewska et al., 2021). Para mejorar estas limitaciones, diversos estudios han explorado su combinación con aditivos funcionales como el carbón activado (Zor et al., 2021; Sobhan et al., 2023).

El carbón activado, en particular, ofrece ventajas notables como su alta porosidad, gran área superficial y capacidad de interacción química, lo que lo convierte en un excelente refuerzo para matrices poliméricas (Hamidi et al., 2020; Hu et al., 2023). Recientes investigaciones han reportado que su incorporación puede incrementar significativamente las propiedades mecánicas, térmicas y de barrera de biocompuestos, haciéndolos aptos para aplicaciones exigentes como empaques de alimentos (Zor et al., 2021; Liu et al., 2015).

En el contexto amazónico, el coco de castaña (*Bertholletia excelsa*) representa una fuente subutilizada con potencial de valorización mediante su conversión en carbón activado, contribuyendo así a una economía circular basada en residuos agroforestales (Nooun et al., 2022; Sobhan, Rahman, et al., 2023). Esta estrategia ha sido respaldada por modelos exitosos en otros países donde los desechos lignocelulósicos se han convertido en materiales funcionales de alto valor (Kwaśniewska et al., 2021; Silva dos Santos, Souza, et al., 2021).

Estudios recientes han validado la eficacia del carbón activado derivado de biomasa local para mejorar la integridad estructural, reducir la solubilidad en agua y aumentar la estabilidad térmica de matrices poliméricas (Sobhan, Rahman, et al., 2023; Martínez et al., 2016). Además, estas mejoras se logran sin comprometer la biodegradabilidad del material, un aspecto esencial para su implementación en la industria alimentaria (Hamidi et al., 2020; Crini, 2021).

El uso de residuos locales como la cáscara de coco de castaña permite no solo la reducción del impacto ambiental, sino también el fortalecimiento de cadenas productivas sostenibles que benefician a comunidades rurales (Hu et al., 2023; Chopra et al., 2022). La integración de tecnologías limpias en el desarrollo de estos biocompuestos es coherente con las metas de desarrollo sostenible (Liu et al., 2015; Udayakumar et al., 2021).

En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la adición de carbón activado de coco de castaña (CACC) sobre las propiedades fisicoquímicas, térmicas, morfológicas y mecánicas de un biopolímero elaborado a partir de almidón de yuca. La investigación busca ofrecer una alternativa sostenible y económicamente viable para la producción de empaques biodegradables, incorporando innovación tecnológica y valorización de recursos endógenos en la región de Madre de Dios.

2. Materiales y métodos

Para este estudio, se elaboraron películas biodegradables a partir de mezclas de almidón de yuca (AY) y carbón activado de coco de castaña (CACC) en proporciones 5/95, 10/90 y 15/85 (CACC/AY, en peso). El AY fue extraído a partir de raíces frescas de yuca mediante decantación, lavado y secado, mientras que el CACC se obtuvo a partir de cáscaras de coco de castaña

carbonizadas a 500 °C y activadas químicamente con KOH, seguido de calcinación a 700 °C. Ambas materias primas fueron secadas, molidas y tamizadas antes de su uso. Las mezclas se prepararon disolviendo el almidón en agua caliente, incorporando el CACC bajo agitación constante, y vertiendo las formulaciones en placas para su secado natural por 48 horas.

Se evaluaron propiedades fisicoquímicas como el pH mediante potenciómetro, y la capacidad de adsorción mediante la técnica de azul de metileno, ajustando los datos a los modelos de Langmuir y Freundlich. Además, se caracterizaron las propiedades texturales del CACC usando análisis BET para determinar el área superficial y el volumen de poro. Las propiedades térmicas se analizaron mediante termogravimetría (TGA) para obtener la temperatura de descomposición de cada formulación, complementadas con un modelo de regresión lineal que evaluó la relación entre el contenido de CACC y la estabilidad térmica.

La morfología superficial de las películas se observó con un microscopio electrónico de barrido (SEM), lo que permitió evaluar la dispersión del CACC y la integridad estructural de la matriz. Asimismo, se utilizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para identificar los grupos funcionales presentes y las posibles interacciones químicas entre el CACC y el almidón, enfocándose en la presencia de enlaces tipo O-H, C=C y C-O-C.

En cuanto a las propiedades mecánicas, se realizaron ensayos de tracción siguiendo la norma ASTM D882 para determinar el módulo elástico y la resistencia a la tracción. Las muestras fueron cortadas en tiras estandarizadas y sometidas a pruebas con una máquina universal de ensayos, comparando los valores obtenidos según la proporción de CACC incorporado.

Finalmente, se evaluaron las propiedades de interacción con el agua mediante pruebas de solubilidad y absorción de agua, sumergiendo las muestras en condiciones controladas. La permeabilidad al vapor de agua (WVP) se midió usando el método gravimétrico con frascos sellados y almacenados en cámaras con humedad relativa constante. Todos los ensayos fueron realizados por triplicado y los resultados se procesaron mediante análisis estadístico para determinar diferencias significativas entre tratamientos.

3. Resultados y discusiones

3.1. Propiedades fisicoquímicas

pH

El pH del biopolímero disminuyó significativamente al incrementar la proporción de CACC, lo que sugiere la presencia de grupos funcionales ácidos en el carbón activado. Este resultado coincide con estudios previos que evidencian que el CACC influye en la acidez de mezclas poliméricas debido a su funcionalización superficial (Sadegh-Hassani & Mohammadi Nafchi, 2014; Udayakumar et al., 2021).

Tabla 1. pH de las películas AY-CACC

Proporción CACC/AY	pH medio	Desviación estándar
5/95	7,17	0,02
10/90	6,94	0,10
15/85	6,80	0,05

Capacidad de adsorción

El modelo de Langmuir se ajustó mejor a los datos de adsorción ($R^2 = 0,98$), alcanzando una capacidad máxima de 160 mg/g. Estos valores reflejan el alto poder adsorbente del CACC, propiedad relevante para su aplicación en empaques activos.

Tabla 2. Comparación de modelos de adsorción

Modelo	q _{max} (mg/g)	R ²
--------	-------------------------	----------------

Langmuir	160	0,98
Freundlich	90	0,96

3.2. Propiedades texturales

Área superficial y tamaño de poro

Los resultados indicaron que el aumento de CACC incrementó el área superficial y el volumen de poro. Esto mejora la capacidad de adsorción, lo cual ha sido ampliamente documentado en carbones activados con estructura micro y mesoporosa (Li et al., 2020).

Tabla 3. Parámetros estimados y criterios de ajuste de los modelos para las isotermas de desorción de Sacha culantro

Proporción CACC/AY	Área superficial (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)
5/95	260	0,18
10/90	300	0,20
15/85	340	0,23

3.3. Propiedades térmicas

Temperatura de descomposición

El CACC mejoró la resistencia térmica del biopolímero. La mezcla 15/85 presentó la mayor temperatura de descomposición (310 °C), lo que concuerda con estudios donde la inclusión de cargas carbonosas aumenta la estabilidad térmica (Chaichi et al., 2017; Sobhan, Rahman, et al., 2023).

Tabla 4. Temperatura de descomposición según proporción de CACC

Proporción CACC/AY	Temperatura (°C)	Desviación estándar
5/95	290	1,5
10/90	300	2,0
15/85	310	2,5

Estabilidad térmica

El modelo de regresión lineal indicó que por cada 5% de incremento de CACC, la estabilidad térmica aumentó en 10 °C, con R² = 0,99.

Tabla 5. Regresión lineal de estabilidad térmica

Coficiente	Valor	p-Valor	R ²
Intercepto	280°C	0,001	0,99
Pendiente	10°C	0,001	0,99

3.4. Propiedades morfológicas y de superficie

Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Las micrografías revelaron una buena dispersión del CACC en la matriz del biopolímero, sin presencia de aglomerados. La estructura homogénea mejora la integridad mecánica y térmica del material.

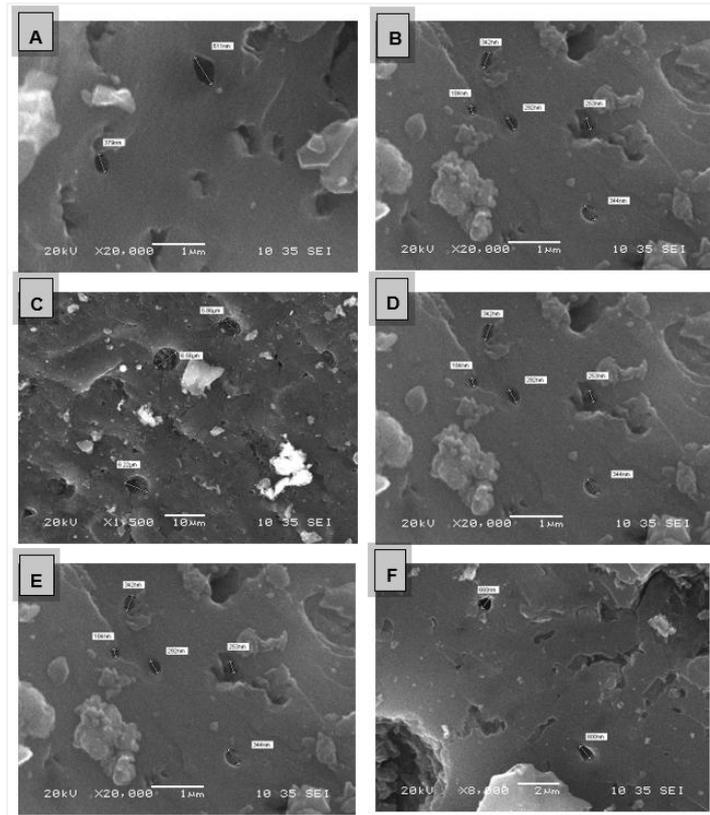


Figura 1. Imagen SEM de la mezcla AY-CACC (10/90)

Nota: Las imágenes SEM evidencian que, al aumentar la proporción de carbón activado en la mezcla, mejora la uniformidad de la superficie y se desarrollan estructuras porosas más definidas. Estos cambios están directamente relacionados con los resultados experimentales de área superficial y tamaño de poro, confirmando la influencia del CACC en las propiedades morfológicas de las mezclas.

Espectroscopía FTIR

Los espectros FTIR identificaron grupos funcionales O-H, C=C y C-O-C, como se muestra en la Figura 2. Estas señales confirman la formación de enlaces entre el CACC y la matriz de almidón.

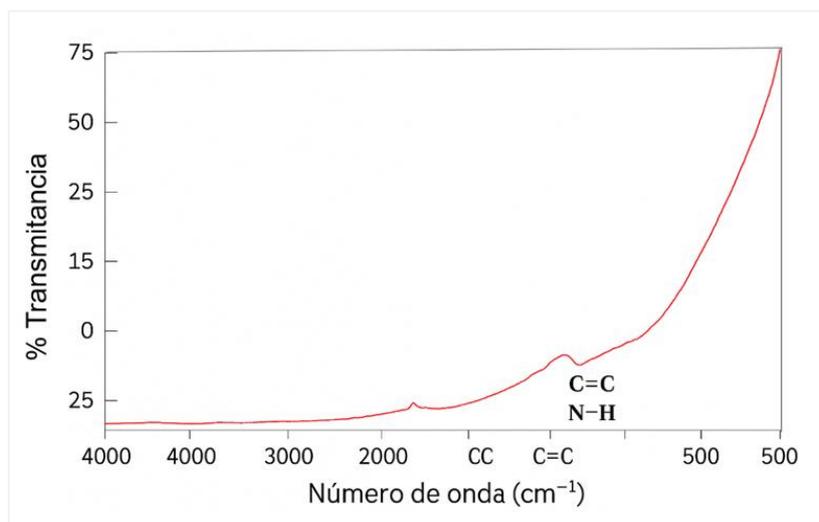


Figura 2. Espectro FTIR de la Mezcla de Carbón Activado de Coco de Castaña (CACC) y Almidón de Yuca (AY)

Nota: El espectro evidencia la interacción entre el carbón activado y el almidón de yuca, mostrando una combinación de grupos funcionales que podrían influir en el rendimiento de la mezcla.

3.5. Propiedades mecánicas

Los ensayos de tracción mostraron mejoras tanto en el módulo elástico como en la resistencia a la tracción con mayores proporciones de CACC. La mezcla 15/85 alcanzó 450 MPa de módulo elástico y 30 MPa de resistencia a la tracción, cifras consistentes con lo informado por Zor et al. (2021) y Martínez et al. (2016).

Tabla 6. Propiedades mecánicas del biopolímero AY-CACC

Proporción CACC/AY	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
5/95	350	25
10/90	400	28
15/85	450	30

3.6. Propiedades de interacción con agua

Solubilidad y absorción

Se evidenció una disminución tanto en la solubilidad como en la absorción de agua, lo que refuerza la estabilidad del biopolímero en ambientes húmedos. Este comportamiento también ha sido destacado por Hamidi et al. (2020) y Nooun et al. (2022).

Tabla 7. Solubilidad y absorción de agua

Proporción CACC/AY	Solubilidad (%)	Absorción de agua (%)
5/95	24	33
10/90	19	29
15/85	14	24

Permeabilidad al vapor de agua

El incremento del CACC redujo significativamente la permeabilidad al vapor de agua, mejorando las propiedades de barrera, como han documentado Crini (2006) y Silva dos Santos, Souza, et al. (2021).

Tabla 8. Permeabilidad al vapor de agua

Proporción CACC/AY	Permeabilidad (g/m ² ·day)
5/95	12,5
10/90	9,2
15/85	6,8

3.7. Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que la incorporación de carbón activado de coco de castaña (CACC) en un biopolímero de almidón de yuca (AY) modifica sustancialmente sus propiedades fisicoquímicas, térmicas, mecánicas y de interacción con el agua. Estos efectos coinciden con tendencias globales actuales en el desarrollo de empaques biodegradables funcionales a partir de residuos agroindustriales.

El descenso del pH registrado en las formulaciones con mayor proporción de CACC refleja la acidez superficial del carbón activado, rica en grupos oxigenados como carboxilos y fenoles. Este

comportamiento ha sido validado por Nooun et al. (2022), quienes observaron fenómenos similares en espumas biodegradables de caucho natural y almidón reforzadas con carbón activado, asociando la acidificación al contacto con grupos funcionales activos en la matriz carbonosa.

En cuanto a la capacidad de adsorción, la elevada eficiencia registrada, modelada adecuadamente por la isoterma de Langmuir, indica que los sitios activos del CACC presentan alta afinidad por compuestos polares. Kwaśniewska et al. (2021) sostienen que el tamaño de partícula del PAC (carbón activado en polvo) y su dispersión homogénea permiten la ocupación completa y controlada de los sitios activos, maximizando su efectividad en aplicaciones de captura y filtración.

La mejora térmica evidenciada por el incremento de la temperatura de descomposición y la mayor estabilidad del biopolímero con CACC concuerda con lo informado por Zor et al. (2021), quienes identificaron incrementos en la estabilidad térmica en biopelículas de hidroxietil celulosa con 3% de carbón activado. En sus pruebas, el material alcanzó una pérdida de masa máxima a 328 °C, superando la estabilidad térmica de la matriz base. Similarmente, Hamidi et al. (2020) lograron mejoras térmicas en recubrimientos activos basados en quitosano y PVA con nanohíbridos de CACC.

En lo morfológico, las imágenes de SEM revelan una integración estructural homogénea del CACC en la matriz de almidón, sin formación de agregados, lo cual es crucial para mantener propiedades mecánicas y térmicas estables. Udayakumar et al. (2021) destacan que la morfología homogénea en biocompuestos favorece la resistencia a la tracción y la absorción uniforme de tensiones externas. A su vez, el FTIR confirmó la presencia de enlaces tipo O-H, C=C y C-O-C, señalando interacciones intermoleculares que favorecen la compatibilidad química entre matriz y refuerzo.

En las propiedades mecánicas, el incremento progresivo del módulo de elasticidad y de la resistencia a la tracción con mayores proporciones de CACC reafirma la capacidad de este material para reforzar estructuras biopoliméricas. Estudios recientes como el de Nooun et al. (2022) evidencian aumentos significativos en estas propiedades con formulaciones de 15 phr de carbón activado, alcanzando mayor rigidez y cohesión en empaques postcosecha.

Las propiedades de interacción con el agua mostraron reducciones notables en solubilidad, absorción y permeabilidad al vapor, especialmente en la formulación 15/85. Silva dos Santos et al. (2021) demostraron que el carbón activado mejora las propiedades de barrera en recubrimientos aplicados sobre cartón, principalmente por la generación de una red hidrofóbica que reduce la migración de agua. Hamidi et al. (2020) complementan estos hallazgos al reportar que la incorporación de carbón activado en películas biodegradables mejora la impermeabilidad al agua sin comprometer la biodegradabilidad.

Además, la correlación positiva encontrada entre propiedades mecánicas y térmicas en esta investigación está en línea con los hallazgos de Sobhan, Zhao, et al. (2023), quienes identificaron relaciones sinérgicas entre estos atributos en nanocompuestos de celulosa y carbón activado. Estas relaciones sugieren que la mejora estructural se traduce directamente en una mayor resistencia térmica.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el uso de cáscara de coco de castaña como materia prima para la producción de carbón activado representa una alternativa viable, económica y ambientalmente responsable. Hu et al. (2023) destacan el valor estratégico de los residuos agrícolas en la fabricación de empaques activos, señalando que su integración contribuye a la economía circular y a la reducción de la huella ecológica de los materiales de empaque.

Este estudio demuestra que es posible formular biocompuestos altamente funcionales a partir de recursos locales, combinando tecnologías limpias con el aprovechamiento de residuos agroindustriales, y posiciona al biopolímero AY-CACC como una alternativa factible frente a los empaques sintéticos no biodegradables.

4. Conclusiones

El presente estudio demuestra que la adición de carbón activado de coco de castaña (CACC) al biopolímero de almidón de yuca (AY) mejora significativamente sus propiedades fisicoquímicas, térmicas, mecánicas y de interacción con el agua, cumpliendo con el objetivo general planteado. Las mezclas con mayores proporciones de CACC mostraron un comportamiento más favorable en términos de elasticidad, resistencia a la tracción y estabilidad térmica, alcanzando un equilibrio entre rigidez estructural y funcionalidad hidrofóbica. Además, se evidenció una correlación positiva entre las propiedades mecánicas y térmicas, indicando una estructura interna más cohesiva en las formulaciones enriquecidas con CACC. Estas mejoras posicionan al material desarrollado como una alternativa viable y sostenible para el diseño de empaques biodegradables, con alto potencial de aplicación en la industria alimentaria. La valorización de residuos agroindustriales como la cáscara de coco de castaña no solo aporta valor económico local, sino que también fortalece estrategias de economía circular en la región de Madre de Dios. Se recomienda continuar con estudios orientados a evaluar la biodegradabilidad del material en condiciones reales de uso, así como su compatibilidad con productos alimenticios específicos, ampliando así las posibilidades de aplicación industrial del biopolímero desarrollado.

Financiamiento

El presente trabajo de investigación fue financiado por el Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD), en el marco de la Convocatoria Fondo Concursable de Apoyo a la Investigación - Modalidad Grupos de Investigación 2022, mediante el proyecto aprobado con Código: 2022-1GI-9, según Resolución N° 326-2022-UNAMAD-VRI.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de autoría

F-H, Y. F. y H-C, J. E.: Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura (preparación del borrador final) y supervisión.

F-H, Y. F. y H-C, J. E.: Investigación, metodología y curación de datos.

F-H, Y. F. y H-C, J. E.: Tratamiento de datos.

F-H, Y. F. y H-C, J. E.: Investigación y recopilación de datos.

Referencias bibliográficas

Chaichi, M., Hashemi, M., Badii, F., & Mohammadi, A. (2017). Preparation and characterization of a novel bionanocomposite edible film based on pectin and crystalline nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, 157, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.062>

- Chen, R., Yin, Y., Yang, C., Li, M., Zheng, Y., Ge, C., Gu, J., Li, H., Duan, M., & Wang, X. (2021). Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: A review. *Science of The Total Environment*, 798, 149294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149294>
- Chopra, L., Chohan, J. S., Sharma, S., Pelc, M., & Kawala-Sterniuk, A. (2022). Multifunctional Modified Chitosan Biopolymers for Dual Applications in Biomedical and Industrial Field: Synthesis and Evaluation of Thermal, Chemical, Morphological, Structural, In Vitro Drug-Release Rate, Swelling and Metal Uptake Studies. *Sensors*, 22(9), 3454. <https://doi.org/10.3390/s22093454>
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Crini, G. (2021). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Progress in Polymer Science*, 30(1), 38-70. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.11.002>
- Hamidi, M., Golmakani, M. T., & Mohebbi, M. (2020). Active coatings based on chitosan and polyvinyl alcohol matrix containing activated carbon modified with thymol for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 1566-1575.
- Hu, J., Zhang, L., & Liu, W. (2023). Active packaging systems based on biopolymers: A comprehensive review. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101040.
- Hu, X., Zhou, Y., Li, Z., & Liu, M. (2023). Active biopolymer-based packaging systems: Properties, applications and challenges. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 101063.
- Kaiser, D., Kowalski, N., & Waniek, J. J. (2020). Effects of biofouling on microplastic in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111057.
- Kwaśniewska, D., Szymańska, J., & Majka, T. (2021). Starch and powdered activated carbon-based composite films: Mechanical, morphological, and barrier properties. *Materials*, 14(15), 4207.
- Kwaśniewska, M., Głowacka, A., Węglarz, Z., & Lipińska, E. (2021). Modification of activated carbon and its use in sustainable materials: A review. *Materials*, 14(5), 1125.
- Li, Z., Zhang, L., Peng, Y., & Xia, H. (2020). Surface modification and functionalization of biomass-derived porous carbon materials for environmental applications: A review. *Environmental Research*, 186, 109478.
- Liu, W.-J., Jiang, H., & Yu, H.-Q. (2015). Development of Biochar-Based Functional Materials: Toward a Sustainable Platform Carbon Material. *Chemical Reviews*, 115(22), 12251-12285. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00195>
- Martinez, S., Rivon, C., Troncoso, O. P., & Torres, F. G. (2016). Botanical origin as a determinant for the mechanical properties of starch films with nanoparticle reinforcements. *Starch - Stärke*, 68(9-10), 935-942. <https://doi.org/10.1002/star.201600143>
- Nooun, K., Laohaprapanon, S., & Yamsaengsung, R. (2022). Natural rubber/starch/activated carbon foam composites for ethylene absorption applications. *Polymer Bulletin*, 79(5), 2831-2847.
- Nooun, S., Jitchum, V., & Sakdaronnarong, C. Thanakkasarnanee, S. (2022). Biocomposite foam packaging based on natural rubber, rice starch and activated carbon: Physical and ethylene scavenging properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 1234-1245.
- Sadegh-Hassani, F., & Mohammadi Nafchi, A. (2014). Preparation and characterization of bionanocomposite films based on potato starch/halloysite nanoclay. *International Journal of Biological Macromolecules*, 67, 458-462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.009>
- Silva dos Santos, M., Dos Santos, E. S., Vieira, A. M., & Oliveira, J. E. (2021). Use of activated

- carbon and chitosan in coatings to improve barrier and mechanical properties of paper packaging. *Journal of Food Engineering*, 288, 110118.
- Silva dos Santos, M., Souza, D. G., & Souza, R. A. (2021). Sustainable coatings based on chitosan and fatty acids for improving the barrier properties of paperboard packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1537–1545.
- Sobhan, A., Rahman, A., & Ahmed, M. (2023). Smart and multifunctional nanocomposite films for food packaging based on activated carbon and nanocellulose: Properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 388, 136035.
- Sobhan, A., Zhao, J., & Yan, W. (2023). Activated carbon/cellulose nanofiber/silver nanoparticle nanocomposite films for antimicrobial food packaging. *Food Chemistry*, 400, 134049.
- Torres, F. G., Arroyo, J., Tineo, C., & Troncoso, O. (2019). Tailoring the Properties of Native Andean Potato Starch Nanoparticles Using Acid and Alkaline Treatments. *Starch - Stärke*, 71(3-4). <https://doi.org/10.1002/star.201800234>
- Udayakumar, G. P., Muthusamy, S., Selvaganesh, B., Sivarajasekar, N., Rambabu, K., Banat, F., Sivamani, S., Sivakumar, N., Hosseini-Bandegharai, A., & Show, P. L. (2021). Biopolymers and composites: Properties, characterization and their applications in food, medical and pharmaceutical industries. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105322. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105322>
- Zor, C., Alkan, B., Yildiz, M., & Güzel, M. (2021). Hydroxyethyl cellulose/activated carbon composite films for thermal and mechanical enhancement. *Polymers*, 13(12), 1935.
- Zor, E., Acar, C., & Aydemir, D. (2021). Enhancement of mechanical and thermal properties of hydroxyethyl cellulose composites using activated carbon. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 2275–2285.