

REVALORACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS MEDIANTE TECNOLOGÍAS VERDES: OBTENCIÓN DE MATERIALES CELULÓSICOS PARA APLICACIONES SOSTENIBLES

*VALORIZATION OF AGRICULTURAL RESIDUES USING
GREEN TECHNOLOGIES: EXTRACTION OF CELLULOSIC
MATERIALS FOR SUSTAINABLE APPLICATIONS*

GABRIELA Y. ROMERO ZÚÑIGA

FLORENTINO SORIANO CORRAL

RESUMEN

Los residuos agrícolas representan una fuente subutilizada de biomasa lignocelulósica con alto potencial para el desarrollo de materiales con aplicaciones avanzadas. Específicamente, la celulosa es un biopolímero que se encuentra presente en las fibras vegetales de tallos, hojas, cáscaras, etc. Este biopolímero puede ser extraído mediante procesos tecnológicos sostenibles que reducen el impacto ambiental asociado. La presente revisión expone las tecnologías verdes más utilizadas para la obtención de materiales celulósicos, como es el tratamiento hidrotermal por explosión de vapor, la radiación de microondas y los procesos biológicos enzimáticos. Se destacan ventajas y principales aplicaciones, las cuales se enfocan en el desarrollo de plásticos biodegradables, remediación del medio ambiente, tratamiento de agua y fabricación de materiales híbridos para construcción. Estas tecnologías y aplicaciones impactan significativamente en la economía circular, ya que fomentan la valorización de residuos agrícolas, contribuyendo al cumplimiento de la Agenda 2030, en apego a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la reducción de la huella de carbono asociada a los procesos de obtención de materiales celulósicos mediante los métodos convencionales. Esta revisión pretende servir como una guía integral para investigadores y profesionales interesados en la transición hacia procesos de extracción de celulosa más sostenibles y su aplicación en el desarrollo de productos de alto valor agregado, en alineación con los principios de la economía circular.

Palabras clave: residuos agrícolas; biomasa; celulosa; economía circular; tecnologías verdes.

Departamento de Procesos de
Transformación de Plásticos,
Centro de Investigación en
Química Aplicada.

Correspondencia
romero.gabriela.pd@ciqa.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7728-533X>
Fecha de recepción
9 de septiembre de 2025.
Fecha de aceptación
4 de octubre de 2025.

ABSTRACT

Agricultural waste represents an underutilized source of lignocellulosic biomass with high potential for the development of materials with advanced applications. Specifically, cellulose is a biopolymer found in plant fibers from stems, leaves, husks and other agricultural remnants. It can be extracted through sustainable technological processes that reduce the associated environmental impact. This review presents the most widely used green technologies for obtaining cellulosic materials, including hydrothermal steam explosion treatment, microwave radiation, and enzymatic biological processes. Their advantages and main applications are highlighted, with a focus on the development of biodegradable plastics, environmental remediation, water treatment, and the fabrication of hybrid construction materials. These technologies and applications have a significant impact on the circular economy, as they promote the valorisation of agricultural waste, contribute to the fulfilment of the 2030 Agenda's Sustainable Development Goals, and reduce the carbon footprint associated with cellulose production through conventional methods. This review aims to serve as a comprehensive guide for researchers and professionals interested in the transition toward more sustainable cellulose extraction processes and their application in the development of high-value-added products, aligned with the principles of the circular economy.

Keywords: *agricultural residues; biomass; cellulose; circular economy; green technologies.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad económica primordial para el desarrollo de la sociedad, sin embargo, es un sector que, año con año, genera una gran cantidad de residuos lignocelulósicos, como tallos, plantas, bagazo, cascarras y hojas (Jayaprakash y col., 2022). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se estima que la producción mundial de residuos agrícolas supera los cinco mil millones de toneladas anuales; los cuales principalmente provienen de la siembra de maíz, arroz, trigo, caña de azúcar, agave, plátano, entre otros. Por lo general,

estos residuos solían considerarse desechos sin valor y en muchos casos se eliminaban mediante quema o descomposición incontrolada, contribuyendo a la contaminación del medio ambiente y a la huella de carbono. No obstante, en los últimos años los desechos agrícolas se han aprovechado para la producción de biogás, biocombustibles, fertilizantes, alimentación animal y en otros productos de valor agregado (Gaffey y col., 2023). A pesar de estos avances tecnológicos, estas aplicaciones no aprovechan completamente el valor estructural de la biomasa lignocelulósica contenida en los residuos agrícolas. Específicamente, los residuos agrícolas están formados por fibras naturales vegetales, constituidas principalmente por celulosa. La celulosa es un biopolímero con propiedades fisicoquímicas adecuadas para el desarrollo de materiales avanzados con aplicaciones en la remediación de agua contaminada, fabricación de celdas solares, materiales biomédicos, textiles y en la fabricación de biocompuestos poliméricos (Mendoza-Tolentino y col., 2025; Romero-Zúñiga y col., 2022).

Tradicionalmente, la celulosa se obtiene mediante métodos convencionales basados en tratamientos químicos agresivos en donde se utilizan soluciones alcalinas fuertes y ácidos concentrados (Samanth & Subrahmanya Bhat, 2023). A pesar de que estos procesos logran separar la celulosa de otros polisacáridos (hemicelulosa y lignina), su aplicación resulta no viable debido a la generación de residuos tóxicos y al elevado consumo energético. Ante esta problemática, han emergido tecnologías más limpias que permiten obtener materiales celulósicos sin generar un impacto ambiental significativo, como la explosión hidrotermal por vapor, la radiación de microondas y los procesos biológicos enzimáticos.

CELULOSA: RECURSO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

La celulosa es un biopolímero abundante en la naturaleza formado por la polimerización escalonada de unidades monoméricas repetitivas de glucosa (Singh y col., 2024). Cuenta con estructuras hidroxílicas, lo cual permite modificarla químicamente para sintetizar sus derivados, como el éter de celulosa (Shen, 2009) o bien, para modificarla químicamente con otros grupos funcionales. Así como con un alto grado de polimerización (300 a 1700) lo cual lo vuelve un material insoluble; y presenta dos regiones: una

cristalina y un amorfa (Samanth & Subrahmanya Bhat, 2023). La región cristalina presenta una disposición de cadenas ordenadas, mientras que la región amorfa se encuentra desordenada (Romero-Zúñiga y col., 2022). Además, es un material biodegradable y biocompatible, y debido a su versatilidad es utilizado en diversos sectores industriales, desde cosmética hasta material de refuerzo para el desarrollo de compuestos poliméricos.

La celulosa puede encontrarse en forma casi pura, como el algodón, que contiene hasta un 90 % en peso de celulosa; sin embargo, una de las formas más accesibles y abundantes de obtenerla es a partir de los residuos agrícolas. Diversas fibras naturales contienen altos porcentajes de celulosa: cáñamo (75 a 80 % en peso), yute (60 a 65 % en peso), bambú (40 a 55 % en peso), paja (40 a 50 % en peso) y madera (40 a 50 % en peso) (Jayaprakash y col., 2022b). A nivel mundial, uno de los residuos que más se produce anualmente es la fibra de madera, aproximadamente 1.750.000 kt, seguida por la borra de algodón (18.450 kt), yute (2.300 kt), bambú (10.000 kt), entre otras (Heinze, 2016; Singh y col., 2024).

En los residuos lignocelulósicos, la celulosa no se encuentra aislada, ya que forma parte de un arreglo helicoidal vegetal junto con otros polisacáridos, como la hemicelulosa, lignina y pectinas (Figura 1). Cada uno de estos polisacáridos presenta distintas propiedades, por lo que su separación selectiva es esencial para aprovechar cada una de ellas (Jayaprakash y col., 2022). Por lo general, la extracción de celulosa se realiza mediante métodos químicos agresivos, como tratamientos con bases fuertes o ácidos concentrados, los cuales logran separar la celulosa de los otros componentes lignocelulósicos, sin embargo, generan residuos tóxicos, consumen grandes cantidades de energía, degradan la fase cristalina que compone a la celulosa, los materiales celulósicos obtenidos presentan una calidad menor, y además se deben de utilizar tratamientos secundarios para eliminar el rastro de las soluciones ácidas o básicas remanentes (Jagadeesh y col., 2021). Ante estas limitaciones, el desarrollo de tecnologías verdes se ha vuelto esencial, surgiendo alternativas como los tratamientos hidrotérmicos asistidos por explosión de vapor, la radiación de microondas y los procesos biológicos por hidrólisis enzimática.

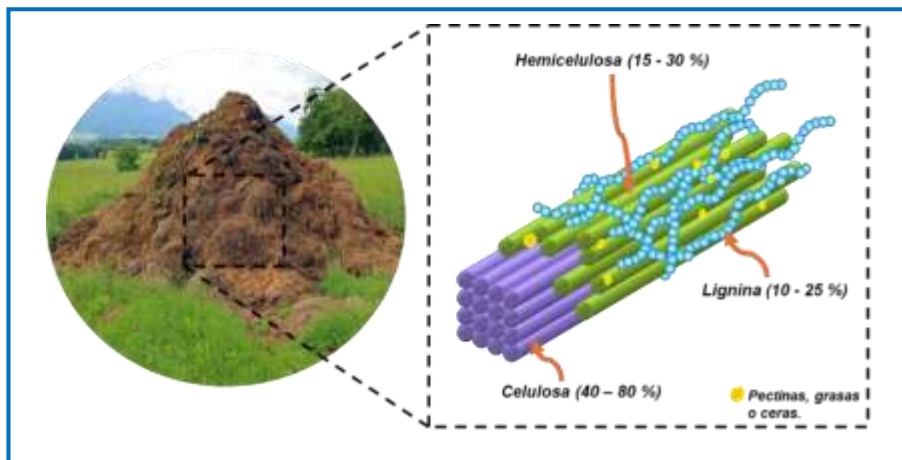


Figura 1. Estructura y composición de las fibras naturales provenientes de desechos agrícolas.

TECNOLOGÍAS VERDES PARA LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA

Los métodos convencionales de extracción de celulosa presentan limitaciones ambientales y económicas, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías verdes más limpias, selectivas y eficientes. Buscan reducir el uso de químicos tóxicos, disminuir el consumo energético y preservar la estructura de la celulosa. Entre las más destacadas se encuentran el tratamiento por explosión de vapor, la radiación de microondas y los procesos enzimáticos (Khan y col., 2022; Navarrete y col., 2011).

El tratamiento de explosión de vapor es un método hidrotermal que combina efectos mecánicos y químicos, utilizando altas temperaturas (160 - 270 °C) y presiones (20 - 50 bar) (Fu y col., 2017). Estas condiciones de proceso favorecen la despolimerización de las fibras lignocelulósicas mediante la hidrólisis de la hemicelulosa y el cizallamiento generado por el vapor saturado descomprimido, lo que provoca la ruptura de la red lignocelulósica y la eliminación parcial de lignina. Como resultado, se incrementa significativamente la accesibilidad a la celulosa (Zhang y col., 2021). Esta tecnología se utiliza principalmente para extraer pulpa de celulosa (Sun y col.,

2005) y se ha reportado su aplicación en fibras de coco (Campos y col., 2024), tallos de palmas (Pérez-Limiñana y col., 2022), desechos de fibras de agave (Weber y col., 2019), entre otros.

La radiación de microondas es un tipo de radiación electromagnética con longitudes de onda entre 1 mm a 1 m, con frecuencias entre 300 GHz y 300 MHz. Su capacidad para generar calor mediante calentamiento dieléctrico, a través de la vibración de moléculas polares, ha sido aprovechada en diversos procesos químicos. La extracción de celulosa asistida por microondas destaca por ser rápida, de bajo consumo energético y libre de subproductos tóxicos. Esta técnica se emplea no solo para extraer y purificar celulosa, sino también para su blanqueamiento y mejora en el índice de cristalinidad (Bangar y col., 2023; Romero-Zúñiga y col., 2023a; Romero-Zúñiga y col., 2023b; Zhang y col., 2017). Se ha aplicado para la obtención de celulosa y nanocelulosa a partir de residuos de aloe vera para la fabricación de hidrogeles (Triantafyllou y col., 2024), residuos de café en combinación con solventes eutécticos (Panyamao y col., 2023), cáscaras de almendra para la extracción de nanocristales de celulosa (Valdés y col., 2022), y algodón destinado para aplicaciones médicas (Bhat y col., 2019), entre otros.

Los procesos enzimáticos permiten extraer celulosa de la biomasa mediante enzimas como las celulasas, que descomponen la estructura de la celulosa en azúcares más simples (Tong y col., 2023). Estas enzimas pueden derivarse de diversos microorganismos y actúan hidrolizando los enlaces glucosídicos del polímero de celulosa. Por lo general se utiliza para obtener nanofibrillas de celulosa (Ribeiro y col., 2019; Squinca y col., 2022)

El tipo de tecnología aplicada influye en la estructura final de la celulosa extraída (Romero-Zúñiga y col., 2023b). La explosión de vapor tiende a reducir el grado de polimerización por ruptura mecánica, pero mantiene la cristalinidad. La radiación de microondas puede incrementar el índice de cristalinidad al favorecer la reorganización de las cadenas, mientras que la hidrólisis enzimática produce microfibrillas con alta cristalinidad y sin subproductos tóxicos (Jagadeesh y col., 2021). Estos cambios estructurales tienen efecto sobre la biodegradabilidad ya que los materiales celulósicos con mayor fracción amorfa tienden a biodegradarse más rápido, mientras que una mayor cristalinidad mejora la estabilidad térmica y mecánica (Khan y col., 2022).



Diversos reportes han comparado el rendimiento de obtención de celulosa (55–80 %), pureza (>90 %), consumo energético y costo, con las metodologías convencionales (Khan y col., 2022). En general, los métodos verdes muestran purezas similares o superiores, con un ahorro energético del 20 al 40 % frente a métodos químicos, aunque la inversión inicial en equipos puede ser mayor. Por ejemplo, la extracción por microondas puede reducir el tiempo de proceso de varias horas a menos de 20 min, mientras que la explosión de vapor logra un pretratamiento efectivo en una sola etapa. Estas ventajas se reflejan en menores emisiones de CO₂ y menor volumen de efluentes (Abolore y col., 2024).

Actualmente, la escalabilidad industrial de estas tecnologías presenta distintos niveles de madurez (Fu y col., 2017). El tratamiento por explosión de vapor cuenta con plantas piloto y semiindustriales, y ya se aplica en procesos de obtención de pulpas papeleras y biocombustibles, aunque requiere altas inversiones en calderas y sistemas de seguridad (Sun y col., 2005). Por otra parte, la radiación de microondas se emplea en reactores de hasta cientos de litros, sin embargo, la homogeneidad de calentamiento y el consumo energético siguen limitando su uso a gran escala (Romero-Zúñiga y col., 2022). En el caso de la hidrólisis enzimática, la limitante principal es el costo de las enzimas y los largos tiempos de reacción, lo cual restringe su aplicación industrial masiva, a pesar de que la tecnología de fermentación para producir enzimas ha avanzado rápidamente en los últimos años (Ribeiro y col., 2019). La Tabla 1 resume las principales ventajas y desventajas de cada tecnología, incluyendo aspectos de escalabilidad industrial, eficiencia y efectos estructurales

Tabla 1. Comparación de las principales tecnologías verdes para la extracción de celulosa a partir de residuos agrícolas, indicando su escalabilidad industrial, eficiencia, pureza y efectos estructurales.

Tecnología verde	Escalabilidad actual	Eficiencia y pureza de celulosa	Efecto en cristalinidad y DP*	Ventajas principales	Desventajas principales
Explosión de vapor	Piloto e industrial en pulpas	60–80 % >90 %	Mantiene cristalinidad, DP menor	Alta eficiencia, bajo tiempo de proceso	Alto costo de equipos y seguridad
Microondas	Piloto (reactores cientos de L)	55–75 % >90 %	Incremento de cristalinidad y DP	Rápido, bajo consumo energético, sin químicos	Homogeneidad de calentamiento limitada a gran escala

Procesos enzimáticos	Piloto (procesos de fermentación)	50–70 % >95 %	Alta cristalinidad, DP conservado	Alta selectividad, sin efluentes tóxicos	Costo de enzimas, tiempo de reacción
-----------------------------	-----------------------------------	------------------	-----------------------------------	--	--------------------------------------

metodologías, como los campos eléctricos pulsados, que incrementan la permeabilidad celular mediante pulsos de alta intensidad; las descargas eléctricas de alto voltaje, que inducen choques mecánicos e hidrodinámicos capaces de descomponer la biomasa; y la extracción con CO₂ supercrítico. Aunque estos métodos son considerados verdes, su implementación aún enfrenta desafíos técnicos y de escalabilidad (Abolore y col., 2024).

La Figura 2 muestra el número de publicaciones científicas relacionadas con cada una de las tecnologías verdes mencionadas, durante los últimos 20 años. Los datos fueron obtenidos a partir de una búsqueda estadística realizada en la base de datos SciFinder®.



Figura 2. Relación de publicaciones científicas asociadas con tecnologías verdes para la extracción de celulosa durante los últimos 20 años. Fuente: SciFinder®.

APLICACIONES SOSTENIBLES Y SU IMPACTO EN LA AGENDA 2030

La celulosa proveniente de residuos agrícolas es un recurso adecuado para impulsar el desarrollo sostenible y contribuir al cumplimiento de la Agenda 2030: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estas aplicaciones permiten dirigirse hacia procesos productivos más responsables y con menor impacto

ambiental en diversos sectores industriales. Por ejemplo, en la industria alimentaria y cosmética, se han utilizado métodos como la extracción asistida con agua y microondas para recuperar fibras de celulosa, polifenoles, antioxidantes y compuestos bioactivos de residuos de manzana, uva y durazno, los cuales se han usado en la fabricación de alimentos funcionales, antioxidantes y cosméticos que reducen el uso de químicos sintéticos (Boggia y col., 2016; Boateng, 2024; Cañadas y col., 2023; Gomez-Contreras y col., 2024; Plazzotta y col., 2020).

Por lo general, la nanocelulosa y microcelulosa se utiliza en la producción de embalaje y envases, bioplásticos, películas biodegradables, recipientes alimenticios, popotes y botellas compostables; todos estos productos son una alternativa renovable en comparación de los plásticos derivados de la refinación de hidrocarburos, lo que ayuda a disminuir la generación de residuos sólidos y a proteger ecosistemas terrestres y marinos (Fernández Ocamica y col., 2025).

Las tecnologías de explosión hidrotermal en combinación con la radiación de microondas han demostrado ser útiles en la fabricación de biocombustibles (Zhang y col., 2017), en agricultura (Serratos y col., 2025), en la fabricación de materiales aislantes para la construcción sustentable, y en sistemas de purificación de agua y aire; contribuyendo específicamente a los ODS 6: Agua limpia y saneamiento, ODS 7: Energía asequible y no contaminante, ODS 9: Industria, innovación e infraestructura y ODS 13: Acción por el clima.

Una de las aplicaciones más prometedoras de los materiales celulósicos extraídos de los residuos agrícolas es su uso como refuerzo en biopolímeros (Mendoza-Tolentino y col., 2025), ya que mejoran las propiedades mecánicas, ofrecen mayor estabilidad térmica e incrementan su degradabilidad. Los biocompuestos reforzados con materiales celulósicos tiene el potencial de ser aplicados principalmente en el sector automotriz, en la construcción y en el diseño de dispositivos biomédicos.

Aprovechar el potencial de los residuos agrícolas para generar productos con valor agregado fortalece la economía circular, impulsa al cumplimiento de las metas globales de la Agenda 2030, y contribuye a reducir la huella de carbono, promoviendo prácticas productivas, más limpias y ambientalmente responsables.

CONCLUSIONES

La agricultura genera millones de toneladas anuales de residuos lignocelulósicos que, si no se gestionan adecuadamente, contribuyen a contaminar el medio ambiente. Sin embargo, estos residuos son ricos en celulosa, un biopolímero renovable y biodegradable con gran potencial para materiales de alto valor agregado. El uso de tecnologías verdes como la explosión de vapor, microondas e hidrólisis enzimática permite extraer celulosa de manera más limpia y eficiente, evitando químicos agresivos y reduciendo el impacto ambiental. Esto facilita su aplicación en la industria alimentaria, dermatológica, en la fabricación de cosméticos, biocombustibles, y principalmente en el desarrollo de biopolímeros reforzados.

Estas aplicaciones no solo son ambientalmente amigables, sino que también fomentan la economía circular y contribuyen al logro de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible dentro de la Agenda 2030, como la producción y consumo responsable, acción climática, salud, agua limpia y energía sostenible.

REFERENCIAS

- Abolore, R.S., Jaiswal, S., Jaiswal, A.K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, **7**: 100396.
- Bangar, S.P., Kajla, P., Ghosh, T. (2023). Valorization of wheat straw in food packaging: A source of cellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, **227**: 762-776.
- Bhat, A.H., Khan, I., Usmani, M.A., Umapathi, R., Al-Kindy, S.M.Z. (2019). Cellulose an ageless renewable green nanomaterial for medical applications: An overview of ionic liquids in extraction, separation and dissolution of cellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, **129**: 750-777.
- Boateng, I.D. (2024). Mechanisms, Capabilities, Limitations, and Economic Stability Outlook for Extracting Phenolics from Agro-byproducts Using Emerging Thermal Extraction

Technologies and Their Combinative Effects. *Food and Bioprocess Technology*, **17**(5): 1109-1140.

Boggia, R., Turrini, F., Villa, C., Lacapra, C., Zunin, P., Parodi, B. (2016). Green Extraction from Pomegranate Marcs for the Production of Functional Foods and Cosmetics. *Pharmaceuticals*, **9**:63

Campos, A.O., Asevedo, E.A., Souza Filho, P.F., Santos, E.S.d. (2024). Extraction of Cellulases Produced through Solid-State Fermentation by *Trichoderma reesei* CCT-2768 Using Green Coconut Fibers Pretreated by Steam Explosion Combined with Alkali. *Biomass*, **4**: 92-106.

Cañadas, R., Sáenz de Miera, B., Méndez, P., González, E.J., González-Miquel, M. (2023). Enhanced Recovery of Natural Antioxidants from Grape Waste Using Natural Eutectic Solvents-Based Microwave-Assisted Extraction. *Molecules*, **28**: 1153

Fernández Ocamica, V., Palacino, B., Bartolomé, C., Bernardes Figueirêdo, M., Lázaro García, C. (2025). Trade-Offs and Synergies of Key Biobased Value Chains and Sustainable Development Goals (SDGs). *Sustainability*, **17**: 3040.

Fu, F., Lin, L., Xu, E. (2017). 4 - Functional pretreatments of natural raw materials. in: *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, (Eds.) M. Fan, F. Fu, Woodhead Publishing, pp. 87-114.

Gaffey, J., Rajauria, G., McMahon, H., Ravindran, R., Dominguez, C., Ambye-Jensen, M., Souza, M.F., Meers, E., Aragonés, M.M., Skunca, D., Sanders, J.P.M. (2023). Green Biorefinery systems for the production of climate-smart sustainable products from grasses, legumes and green crop residues. *Biotechnology Advances*, **66**, 108168.

Gomez-Contreras, P.A., Obando, C., Freitas, P.A., Martin-Perez, L., Chiralt, A., Gonzalez-Martinez, C. (2024). Applying Subcritical Water Extraction to Obtain Bioactive Compounds and Cellulose Fibers from Brewer Spent Grains. *Molecules*, **29**:4897.

Heinze, T. (2016). Cellulose: Structure and Properties. in: *Cellulose Chemistry and Properties: Fibers, Nanocelluloses and Advanced Materials*, (Ed.) O.J. Rojas, Springer International Publishing. Cham, pp. 1-52.

Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S. (2021). A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications. *Polymer Composites*, **42**(12): 6239-6264.

Jayaprakash, K., Osama, A., Rajagopal, R., Goyette, B., Karthikeyan, O.P. (2022). Agriculture Waste Biomass Repurposed into Natural Fibers: A Circular Bioeconomy Perspective. *Bioengineering*, **9**: 296.

Khan, R., Jolly, R., Fatima, T., Shakir, M. (2022). Extraction processes for deriving cellulose: A comprehensive review on green approaches. *Polymers for Advanced Technologies*, **33**(7): 2069-2090.

- Mendoza-Tolentino, Y., González Morones, P., Sánchez-Valdés, S., Soriano-Corral, F., da Silva, L., García-Hernández, Z., Hernández-Hernández, E., Romero-Zúñiga, G.Y. (2025). Effect of Hollow Cellulose Fibers From Agro-Industrial Waste on the Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of Nylon-6 Biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, **142**(23): e57276.
- Navarrete, A., Herrero, M., Martín, A., Cocero, M.J., Ibáñez, E. 2011. Valorization of solid wastes from essential oil industry. *Journal of Food Engineering*, 104(2): 196-201.
- Panyamao, P., Charumanee, S., Ruangsuriya, J., Saenjum, C. (2023). Efficient Isolation of Cellulosic Fibers from Coffee Parchment via Natural Acidic Deep Eutectic Solvent Pretreatment for Nanocellulose Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **11**(38): 13962-13973.
- Pérez-Limiñana, M.A., Pérez-Aguilar, H., Ruzafa-Silvestre, C., Orgilés-Calpena, E., Arán-Ais, F. (2022). Effect of Processing Time of Steam-Explosion for the Extraction of Cellulose Fibers from Phoenix canariensis Palm Leaves as Potential Renewable Feedstock for Materials. *Polymers (Basel)*, **14**(23): 5206
- Plazzotta, S., Ibarz, R., Manzocco, L., Martín-Belloso, O. (2020). Optimizing the antioxidant biocompound recovery from peach waste extraction assisted by ultrasounds or microwaves. *Ultrasonics Sonochemistry*, **63**: 104954.
- Ribeiro, R.S.A., Pohlmann, B.C., Calado, V., Bojorge, N., Pereira, N., Jr. (2019). Production of nanocellulose by enzymatic hydrolysis: Trends and challenges. *Eng Life Sci*, **19**(4): 279-291.
- Romero-Zúñiga, G.Y., González-Morones, P., Sánchez-Valdés, S., Yáñez-Macías, R., Sifuentes-Nieves, I., García-Hernández, Z., Hernández-Hernández, E. (2022). Microwave Radiation as Alternative to Modify Natural Fibers: Recent Trends and Opportunities – A Review. *Journal of Natural Fibers*, **19**(14): 7594-7610.
- Romero-Zúñiga, G.Y., Sánchez-Valdés, S., Cenicerós-Reyes, M.A., Sifuentes-Nieves, I., Gallardo-Vega, C.A., Solís-Rosales, S.G., González-Morones, P., Hernández-Hernández, E. (2023a). A one-step process to produce high-crystallinity cellulose microfibrils from microwave irradiation of natural fiber waste. *Cellulose*, **30**(16): 10067-10082.
- Romero-Zúñiga, G.Y., Sánchez-Valdés, S., Sifuentes-Nieves, I., Yáñez-Macías, R., González-Morones, P., Hernández-Hernández, E. (2023b). Study of the microwave-assisted hydrothermal extraction of polysaccharides from agave fiber: production of hollow cellulose fibers. *Cellulose*, **30**(9): 5535-5547.
- Samanth, M., Subrahmanya Bhat, K. (2023). Conventional and unconventional chemical treatment methods of natural fibres for sustainable biocomposites. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, **3**: 100034.

- Serratos, I.N., García Torres, J.A., Mendoza Téllez, J.L., Silva Roy, D., Soto Estrada, A.M., Leyva López, N.E., Rodríguez González, H., Le Borgne, S., Sánchez-Sánchez, K.L., Sosa Fonseca, R. (2025). Banana Peel Based Cellulose Material for Agriculture and Aquiculture: Toward Circular Economy. *Polymers*, **17**: 1230.
- Shen, Q. (2009). Chapter 12. Surface Properties of Cellulose and Cellulose Derivatives: A Review. in: *Model Cellulosic Surfaces*, (Ed. Maren Roman) Vol. 1019, Oxford University Press, pp. 259-289.
- Singh, S., Bhardwaj, S., Meda, R.S., Jain, S., Maji, P.K. (2024). 2 - Biocomposites with cellulosic fibers. in: *Advances in Biocomposites and their Applications*, (Ed.) N. Karak, Woodhead Publishing, pp. 41-79.
- Squinca, P., Bilatto, S., Badino, A.C., Farinas, C.S. (2022). The use of enzymes to isolate cellulose nanomaterials: A systematic map review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, **3**: 100212.
- Sun, X.F., Xu, F., Sun, R.C., Fowler, P., Baird, M.S. (2005). Characteristics of degraded cellulose obtained from steam-exploded wheat straw. *Carbohydrate Research*, **340**(1): 97-106.
- Tong, X., He, Z., Zheng, L., Pande, H., Ni, Y. (2023). Enzymatic treatment processes for the production of cellulose nanomaterials: A review. *Carbohydrate Polymers*, **299**:120199.
- Triantafyllou, E., Karydis-Messinis, A., Moschovas, D., Kyriakaki, C., Vasilopoulos, K.C., Giannakas, A.E., Karakassides, M.A., Avgeropoulos, A., Zafeiropoulos, N.E., Salmas, C.E. (2024). Microwave-Assisted Extraction of Cellulose from Aloe Vera Plant Residue and Preparation of Cellulose Nanocrystal–Poly(vinyl alcohol) Hydrogels. *Molecules*, **29**:6012.
- Valdés, A., Mondragon, G., Garrigós, M.C., Eceiza, A., Jiménez, A. (2022). Microwave-assisted extraction of cellulose nanocrystals from almond (*Prunus amygdalus*) shell waste. *Front Nutr*, **9**: 1071754.
- Weber, B., Estrada-Maya, A., Sandoval-Moctezuma, A.C., Martínez-Cienfuegos, I.G. (2019). Anaerobic digestion of extracts from steam exploded Agave tequilana bagasse. *Journal of Environmental Management*, **245**: 489-495.
- Zhang, H., Han, L., Dong, H. (2021). An insight to pretreatment, enzyme adsorption and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: Experimental and modeling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **140**, 110758.
- Zhang, Z., Song, J., Han, B. (2017). Catalytic Transformation of Lignocellulose into Chemicals and Fuel Products in Ionic Liquids. *Chemical Reviews*, **117**(10): 6834-6880.