

MICROCELULOSA, UN POLÍMERO NATURAL DISPONIBLE PARA TODOS

MICROCELLULOSE A NATURAL POLYMER AVAILABLE TO EVERYONE

Eliud Salvador Rodríguez-Quiroz*¹
Claudia Santacruz-Vázquez¹
Verónica Santacruz-Vázquez¹
Santa Toxqui-Lopez³

¹ Facultad de Ingeniería Química, Ciudad Universitaria, Av. San. Claudio y Blvd. 18 sur, Col. Jardines de San Manuel, C.P.72570, Puebla, Pue.

² Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Capitán Carlos Camacho Espíritu s/n, Jardines de San Manuel, C.P. 72570 Puebla, Pue.

*Correo electrónico: 221570078@viep.com.mx

Abstract

One of the natural polymers that have revolutionized history is cellulose, which is obtained from lignocellulosic materials available in unlimited quantities in biomasses such as plants. Physically, cellulose has the form of long and inelastic fibers superimposed in layers that provide the resistance to support the weight of the plant and chemically cellulose is a linear homopolymer of D-glucopyranose units, joined by $\beta(1-4)$ glycosidic bonds, its parallel chains are aligned on their longitudinal axis and establish a large number of intermolecular hydrogen bridges, which gives rise to highly structured microcellulose fibers. Therefore, the objective is the extraction of these micrometer-sized cellulosic fibers due to their physicochemical characteristics. The most accessible method is by mechanical treatments such as grinding, high pressures, defibrillations that break the cell walls into small fragments reducing the degree of polymerization to access the fibers, followed by chemical methods that hydrolyze, saponify, dissolve or oxidize the structure of the lignocellulosic components surrounding the cellulose. The results are the manufacture of paper, from the biomass of trees or wood, in construction using insulators formed with microcellulose fibers. Other results are the generation of thermoplastic materials, biopolymeric films and molded parts, seen in the food industry for fresh food packaging and have been used to improve the mechanical properties of materials with polymeric matrix to generate new materials in various areas.

Keywords: Lignocellulosic Materials, microcellulosic fibers, biomass cellulose.

Resumen

Uno de los polímeros naturales que han revolucionado la historia, es la celulosa que se obtiene de materiales lignocelulósicos disponibles de manera ilimitada en biomásas como las plantas. De manera física la celulosa tiene forma de fibras largas e inelásticas superpuestas en forma de capas que brindan la resistencia para soportar el peso de la planta y químicamente la celulosa es un homopolímero lineal de unidades de D-glucopiranosas, unidas mediante enlaces glucosídicos $\beta(1-4)$, sus cadenas paralelas se alinean sobre su eje longitudinal y establecen un gran número de puentes de hidrógeno intermoleculares, lo que da origen a fibras microcelulósicas altamente estructurada. Por lo que el objetivo es la extracción de estas fibras celulósicas de tamaño micrómetro debido a sus características fisicoquímicas. El método más accesible es por tratamientos mecánicos como la molienda, altas presiones, desfibrilaciones que rompen las paredes celulares en fragmentos pequeños reduciendo el grado de polimerización para acceder a las fibras, siguiendo con métodos químicos que hidrolizan, saponifican, disuelven u oxidan la estructura de los componentes lignocelulósicos que rodean a la celulosa. Teniendo como resultados la fabricación de papel, provenientes de la biomasa de los árboles o de las maderas, en el área de la construcción usando aislantes formados con fibras microcelulósicas. Otros resultados es la generación de materiales termoplásticos, películas biopoliméricas y piezas moldeadas, vistos en la industria alimentaria para el embalaje de alimentos frescos y se han empleado para mejorar las propiedades mecánicas de materiales con matriz polimérica para generar nuevos materiales en diversas áreas.

Palabras clave: Materiales lignocelulósicos, fibras micro celulósicas, biomasa, celulosa.

Introducción

Un hallazgo que marcó el desarrollo de los biomateriales poliméricos, fue la extracción de la celulosa en 1838 por el científico Anselme Payen, quien determinó su fórmula química a partir de diversos tratamientos químicos en leños (Jawaid et al., 2017). La celulosa proviene de materiales lignocelulósicos (MLCs), presentes en las plantas, que contienen celulosa, hemicelulosa y lignina en diferentes concentraciones. Varios autores han reportado la composición de diferentes biomásas, estableciendo que el 35-45% corresponde a celulosa, 6-35% a hemicelulosa y de 15-36% de lignina. Se resalta que la celulosa es el componente con mayor porcentaje (Cardoso & Cerecedo, 2008), tal y como se presenta en la Tabla 1. La composición y características de los MLCs, han permitido ser empleados como materias primas en multitud de procesos en la industria química. Su carácter renovable, abundancia y bajo costo aumentan el interés de su uso a nivel industrial aunado a que es considerado un soporte estructural, por su impermeabilidad y resistencia en el desarrollo de materiales compuestos. La biomasa vegetal, está conformada por cenizas, humedad, grasas, un nivel bajo de proteínas y por último los carbohidratos que son biomoléculas, donde se incluyen los compuestos lignocelulósicos (Möller, 2014; Flor & Coral, 2019; Ee et al., 2021).

Tabla 1. Compuestos lignocelulósicos de diversas plantas

Biomasa	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Referencia
Arroz	35	25	20	(Ee et al., 2021)
Plátano	47	29	22	(Sernaqué Aucahuasi et al., 2020).
Maíz	45	35	15	(Cuervo et al., 2009).
Cacahuete	45	6	36	(Ee et al., 2021).

Tabla 1. Compuestos lignocelulósicos de diversas plantas

La lignina se encarga de transportar agua, nutrientes y metabolitos en el sistema vascular (Baruah et al., 2018). La hemicelulosa permite la rigidez de la pared celular a través de la interacción de la celulosa con la lignina (Wyman, 1999). La celulosa contiene forma de fibras largas e inelásticas superpuestas en forma de capas que brindan la resistencia a las presiones osmóticas que endurecen a las plantas obteniendo un crecimiento erguido soportando todo el peso de la planta (McNamara et al., 2015).

Materiales lignocelulósicos (MLCs)

Lignina

La lignina representa típicamente entre un 10-25% en peso seco de los materiales lignocelulósicos (MLCs). Rodea y protege a las fibras de celulosa lo que brinda una mayor rigidez a las células, impermeabilizándolas y protegiéndose de ataques enzimáticos (Ten & Vermerris, 2015). Se trata de un polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización de unidades de fenilpropano que implica la formación de diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada. La mayoría de la lignina se encuentra situada en el espacio intercelular y en la pared primaria de la célula. Se va depositando a lo largo de la vida de la célula comenzando por el espacio intercelular. La lignina es el polímero natural más complejo con relación a su estructura y heterogeneidad por lo que no es posible adscribirle una estructura definida. Los componentes estructurales de los compuestos lignocelulósicos se presentan en la Figura 1. (Cuervo et al., 2009)

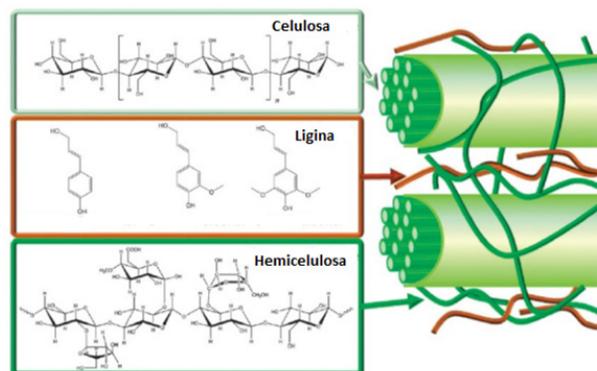


Figura 1. Componentes estructurales de los compuestos lignocelulósicos (Alonso, et. al., 2012).

Hemicelulosa

La hemicelulosa o hemicelulosas son un grupo de heteropolisacáridos constituidos por cadenas cortas y ramificadas de azúcares presentes en la Figura 2, entre los que destacan pentosas (generalmente D-xilosa y L-arabino-sa), hexosas (como D-galactosa, D-glucosa y D-manosa), así como ácidos urónicos (ácidos glucurónicos, 4-O-metilgalacturónico y galacturónico) y desoxihexosas (ramnosa y fucosa)

(Grilli et al., 2015). Los grupos hidroxilo de los azúcares constituyentes pueden estar parcialmente sustituidos por grupos acetilo (Ten & Vermeris, 2015).

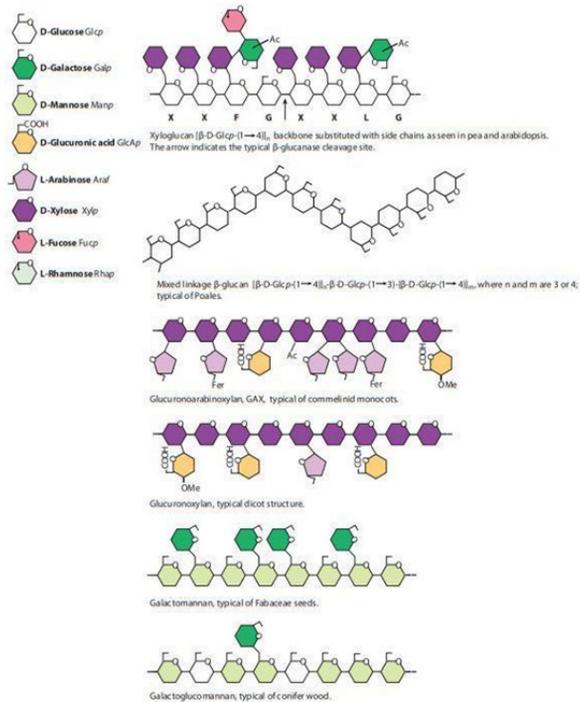


Figura 2. Estructura química de las unidades estructurales de las hemicelulosas (Scheller & Ulvskov, 2010).

La naturaleza ramificada de las hemicelulosas determina su carácter amorfo, y la facilidad con que transcurren las reacciones de hidrólisis de los polímeros para dar lugar a sus azúcares constituyentes. Generalmente son solubles en soluciones alcalinas concentradas (18 a 24% de los hidróxidos de sodio o de potasio), presentan una estructura amorfa (aun cuando algunos tipos desarrollan una forma fibrilar), y actúan como agentes cementantes en el tejido vegetal. Las hemicelulosas son más fáciles de solubilizar e hidrolizar que la celulosa (Di Donato et al., 2014). Las hemicelulosas representan entre un 10-45% en peso seco de los materiales lignocelulósicos (MLCs). En estado natural se encuentran en forma amorfa con un grado de polimerización de aproximadamente 200-300. Existen dos tipos principales de hemicelulosas: los xilanos y los glucomanos (Grilli et al., 2015). Los xilanos son las hemicelulosas mayoritarias en las paredes celulares de las maderas duras y de las plantas herbáceas, y constituyen el 20-30% en peso de los materiales (Farinas et al., 2018).

Celulosa

Han pasado más de 185 años desde el descubrimiento de la celulosa y sigue estando vigente y al alcance en el mundo de los biopolímeros. Ya se dijo que la celulosa es el polímero natural más abundante de la tierra (Zhao et al., 2021). En términos fisicoquímicos la lignina, hemicelulosa y celulosa son macromoléculas que pueden formar polímeros naturales (Wyman, 1999). Sin embargo, la celulosa se compone de piezas con una estructura cristalina en forma de microfibrillas de celulosa o paquetes de celulosa como se aprecia en la Figura 3, convirtiéndola en el compuesto de mayor interés en la investigación e industria de los materiales poliméricos (Jawaid et al., 2017). La celulosa puede tener una función en las plantas, también puede utilizarse por las fibras para elaboración de biomateriales, o fuente de energía para ciertos microorganismos, es decir que su composición química permite diversificar los usos de la celulosa (Liu et al., 2021).

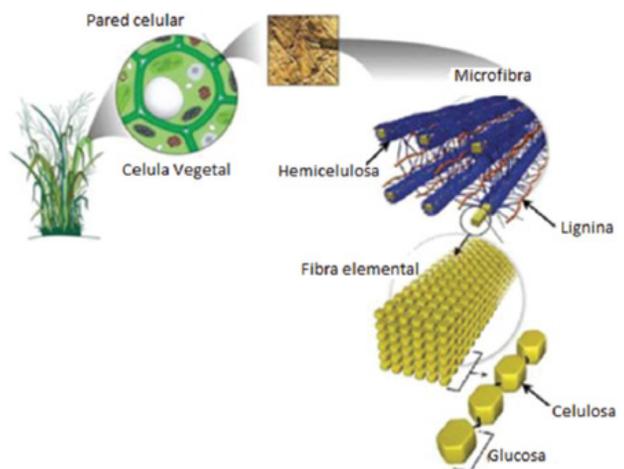


Figura 3. Estructura de la pared vegetal (Suárez et al., 2019).

Propiedades fisicoquímicas de las fibras microcelulósicas

Es importante mencionar que las fibras celulósicas presentes en la biomasa están disponibles en tamaño microscópico (Somerville, 2006). La celulosa posee grupos hidroxilos que la hacen químicamente ser considerada un polialcohol. La cadena carbonada de los monosacáridos no está ramificada y todos los átomos de carbono con excepción de uno contienen un grupo alcohol (-OH). El átomo de carbono restante tiene unido un grupo car-

bonilo (C=O). Si este grupo carbonilo está en el extremo de la cadena se trata de un grupo aldehído (-CHO) y el monosacárido recibe el nombre de aldosa. Si el grupo carbonilo está en cualquier otra posición, se trata de una cetona (-CO-) y el monosacárido recibe el nombre de cetosa (Lee & Yoo, 2021; Keller, 2019; Budtova, 2019; Jawaid et al., 2017).

La celulosa es un homopolímero lineal de unidades de D-glucopiranosas, estando estas unidades monoméricas unidas mediante enlaces glucosídicos (1-4), su peso molecular y resistencia mecánica y química se debe a que sus cadenas paralelas se alinean sobre su eje longitudinal y establecen un gran número de puentes de hidrógeno intermoleculares, lo que da origen a microfibrillas altamente estructuradas (Chávez-Guerrero et al., 2018; Budtova, 2019). Tiene zonas cristalinas y amorfas: las primeras se producen cuando las moléculas se entrelazan con alto grado de ordenación, mientras que en las zonas amorfas no existe este orden. A pesar de tener muchos hidroxilos libres como se muestra en la Figura 4, es muy poco soluble en agua, debido a que estos grupos no se hidratan por estar actuando entre sí (Tian et al., 2016)

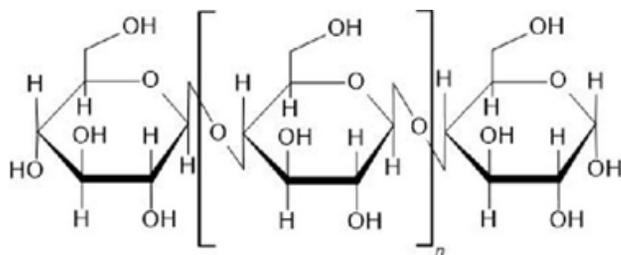


Figura 4. Estructura química de la celulosa (Molina & Flórez, 2020).

Su configuración le permite tener una estructura estable, formando cadenas largas y lineales de glucosa, las cuales se presentan unidas entre sí por medio de enlaces de puentes de hidrógeno con el oxígeno y fuerzas de Van der Waals (Liu et al., 2021). Formando regiones cristalinas, fuertes y rígidas. Estos componentes estructurados están conectados a las regiones flexibles (Chávez-Guerrero et al., 2018). Las largas y delgadas hebras de celulosa conectadas forman lo que se llaman microfibrillas con particularidades de resistencia y flexibilidad (Ramos Cassellis et al., 2020). For-

mando múltiples tipos de morfologías, estructuras supramoleculares, relaciones de aspecto y por ende propiedades físicas y mecánicas muy variadas (Jawaid et al., 2017).

Obtención de microcelulosa

La forma más sencilla para obtener este polímero natural se lleva a cabo por acciones mecánicas tales como proceso de molienda, altas presiones, desfibrilaciones entre otras, como se observa en la Figura 5 que consisten en el corte de la biomasa lignocelulósica en fragmentos pequeños reduciendo el grado de polimerización (Omran et al., 2021). Técnicas como la desfibrilación o la homogenización de altas presiones rompen las paredes vegetales de la planta hasta la obtención de las microfibras celulósicas (Tian et al., 2016). Existen métodos de explosión o de vapor que son considerados tratamientos mecánicos que llevan a la biomasa a temperaturas altas para generar un choque térmico y así despresurizar la materia orgánica (Zeng et al., 2014). Inclusive con agua caliente se puede solubilizar parte de la hemicelulosa para efectuar la separación de los compuestos lignocelulósicos (Terinte et al., 2017).

Estas técnicas promueven el fácil acceso para la obtención del componente microcelulósico, siendo estas técnicas métodos amigables con el medio ambiente y de fácil alcance, es decir todos podríamos obtener estos polímeros naturales (Ee et al., 2021). Sin embargo, la eficiencia, es la desventaja principal de estas técnicas, ya que no logran separar por completo las fibras microcelulósicas de la lignina y la hemicelulosa. (Jawaid et al., 2017).



Figura 5. Mecanismos para la obtención física de las fibras microcelulósicas. (Imágenes tomadas de (Microfluidics, 2023; Hielscher, 2023; Ceva-graf, 2023; HRS, 2023). Síntesis propia.

Para mejorar la extracción celulósica es conveniente la incorporación de tratamientos químicos que descomponen las estructuras de los componentes lignocelulósicos (Budtova, 2019). En la Tabla 2 se señalan los métodos para la disociación de la lignina y hemicelulosa.

Método Químico	Reactivos	Efecto	Referencia
Alcalino	NaOH, KOH, Ca(OH) ₂	Solvatación y saponificación	(Liu et al., 2021)
Ácido	HCl, H ₂ SO ₄ , HBr	Hidrólisis	(Gong et al., 2017)
Solventes orgánicos	C ₂ H ₆ O ₂ , CH ₃ OH, C ₃ H ₈ O	Hidrólisis	(Jawaid et al., 2017)
Agente oxidante	H ₂ O ₂ , C ₂ H ₄ O ₃ , O ₃	Oxidación	(Isogai & Bergström, 2018)
Líquidos iónicos	1-alkil-3-metilimidazolio, 1-butil-3-metilpiridinio	Disolventes	(Cruz et al., 2013)
Tratamientos biológicos	Celulasas, Trichoderma reesei	Proceso enzimático	(Farinas et al., 2018)

Tabla 2. Métodos químicos para la obtención de celulosa.

Para obtener microcelulosa pura, no es suficiente un procedimiento químico, por lo que combinar diversos tratamientos es la manera más eficiente para su obtención. Varios autores proponen usar el método alcalino como un pretratamiento de la biomasa lignocelulósica, seguido de un tratamiento con algún agente oxidante para terminar con una hidrólisis ácida (Gonçalves et al., 2021; Omran et al., 2021). En la Figura 6 A) se presenta la forma final que tiene la celulosa después de la separación de los compuestos lignocelulósicos y B) las apariencias de las fibras microcelulósicas por medio de una micrografía de un microscopio electrónico de barrido.

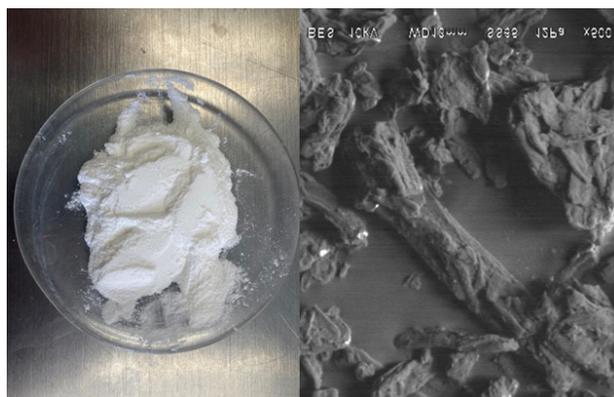


Figura 6. Presentación del compuesto celulósico. A) Observación macroscópica B) Observación microscópica en MEB (500X). (Elaboración propia).

Aunque el objetivo de estos métodos es aislar a la celulosa de la materia vegetal, cada tratamiento o la combinación de estos, afecta directamente las propiedades de las fibras microcelulósicas, por lo que la elección de los métodos depende de la aplicación que se desea (Liu et al., 2021). Una de las ventajas que ofrecen estos tratamientos, es la selectividad para ajustar cada tratamiento con la biomasa que se trabaje, otra ventaja es la eficiencia de la extracción de las fibras celulósicas, además de la manipulación de la materia celulósica para mezclar con otros materiales poliméricos (McNamara et al., 2015). Por otro lado, una desventaja importante de estos tratamientos químicos es la generación de algunos residuos químicos, pero cada fracción puede tener un tratamiento para reducir la nocividad o puede ser utilizado como materia prima para un nuevo estudio (Cruz et al., 2013). Esto no quiere decir que los métodos químicos sean difíciles de acceder o que solo científicos capacitados puedan emplear los tratamientos, pues con las condiciones establecidas y una capacitación es posible la obtención de la celulosa pudiendo estar al alcance de todos (Wyman, 1999).

Aplicaciones de las fibras microcelulosas

Una de las primeras aplicaciones que recibieron las fibras microcelulósicas es la fabricación de papel, provenientes de la biomasa de los árboles o de las maderas (Jawaid et al., 2017). La industria textil también se vió beneficiada con las fibras microcelulósicas pues son empleadas en la elaboración de una enorme gama de ropa. Un efecto se puede apreciar cuando los enlaces de hidrógeno que mantienen a las cadenas moleculares inmóviles entre sí son débiles y cuando las telas se doblan o arrugan, en especial en presencia de humedad las cadenas se mueven libremente hasta nuevas posiciones. Al retirar la presión no hay fuerzas entre las fibras que restauren a las cadenas a sus posiciones originales, de manera que las telas permanecen arrugadas (Yousefian & Rodrigue, 2017).

Con el paso del tiempo y de las investigaciones hechas se fueron creando materiales termoplásticos, películas biopoliméricas y piezas moldeadas, este tipo de materiales se ven en la industria alimentaria para el embalaje o para la conservación de alimentos frescos. Se puede utilizar como espesante en los alimentos tipo salsas actuando como emulsión para evitar la

humedad (Liu et al., 2021; Lee & Yoo, 2021). En la industria de la construcción se usan aislantes formados con las fibras microcelulósicas. Pero lo más importante es que las fibras microcelulósicas se pueden emplear para mejorar las propiedades mecánicas de materiales con matriz polimérica para generar nuevos materiales en diversas áreas (Yousefian & Rodrigue, 2017).

Conclusión

Es un hecho que donde allá materiales lignocelulósicos es posible obtener el contenido celulósico, ya que la disponibilidad está presente en todo el ciclo de transformación de la planta, desde la semilla, el tallo, la hoja, el fruto e incluso los residuos que se van formando. Las fibras microcelulósicas son obtenidas por medio de procesos mecánicos y/o químicos teniendo una eliminación del compuesto lignina y del compuesto hemicelulosa debido a la estructura jerárquica que acompañan a la reducción progresiva de tamaño, pureza y aplicación deseadas. Estas microfibras de celulosa son altamente ordenadas brindando características de insolubilidad, rigidez y mejoras a ciertas propiedades mecánicas como la tensión, elasticidad, etc. Por lo que es necesario seguir generando estudios que siguen evaluando el contenido lignocelulósico de las diversas biomásas para la manufacturación de microcelulosa, innovando en los métodos de obtención y de aplicación.

Agradecimientos

Se agradece a todos los colaboradores que participaron para esta publicación, se extiende el agradecimiento al estudio de posgrados de Facultad de ingeniería química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, así como a CONACYT por el apoyo brindado.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

Alonso, D. M.; Wettstein, S. G.; Dumesic, J. A. (2012). Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. *Chemical Society Reviews*, 41: 8075-8098. (<https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/f86f3bf7a54bd6a536737ecd685893ffd36b2011/3-Figure2-1.png>)

Baruah, J., Nath, B. K., Sharma, R., & Kumar, S. (2018). Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products. *Front. Energy Res.* 6(141), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00141>.

Di Donato, P., Poli, A., Taurisano, V., & Nicolaus, B. (2014). Polysaccharides Applications in Biology and Biotechnology Polysaccharides from BioagroWaste New Biomolecules Life Polysaccharides. *Polysaccharides*, 2017(May), 1-19. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03751-6>

Breznak, J. A., & Brune, A. (1994). Role of microorganisms in the digestion of lignocellulose by termites. *Annu. Rev. Entomol.*, 39, 453–487.

Budtova, T. (2019). Cellulose II aerogels: a review. *Cellulose* 26,(1). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2189-1>

Cardoso, E., & Cerecedo, M. (2008). Obtención de carboximetil celulosa usando Lemna como materia prima *Revista iberoamericana de.* 20(1), 1–2. <https://rieoei.org/historico/deloslectores/2652EspinosaV2.pdf>

Cevagraf Blog (2023). Cevagraf Imprenta. Cevagraf Coop. Recuperado de <https://www.cevagraf.coop/blog/pasta-mecanica-y-pasta-quimica/>. (<https://www.cevagraf.coop/blog/wp-content/uploads/sites/16/2014/05/desfibrador-de-muela.jpg>).

Chávez-Guerrero, L., Sepúlveda-Guzmán, S., Silva-Mendoza, J., Aguilar-Flores, C., & Pérez-Camacho, O. (2018). Eco-friendly isolation of cellulose nanoplatelets through oxidation under mild conditions. *Carbohydrate Polymers*, 181(November), 642–649. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.100>

Cruz, A. G., Scullin, C., Mu, C., Cheng, G., Stavila, V., Varanasi, P., Xu, D., Mentel, J., Chuang, Y. De, Simmons, B. A., & Singh, S. (2013). Impact of high biomass loading on ionic liquid pretreatment. *Biotechnology for Biofuels*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-52>

Cuervo, L., Folch, J., & Quiroz, R. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *Bio Tecnología*, 13(3), 11–25. http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Lignocelulosa.pdf

Ee, L. Y., Fong, S., & Li, Y. (2021). Recent advances in 3D printing of nanocellulose: structure, preparation, and application prospects *Nanoscale Advances*. 3(5). <https://doi.org/10.1039/d0na00408a>

Farinas, C. S., Marconcini, J. M., & Mattoso, L. H. C. (2018). Enzymatic conversion of sugarcane lignocellulosic biomass as a platform for the production of ethanol, enzymes and nanocellulose. *Journal of Renewable Materials*, 6(2), 203–216. <https://doi.org/10.7569/JRM.2017.6341578>

Flor, M., & Coral, C. (2019). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DEL BAMBÚ. *Av. Cien. Ing.* 10(4). 1-13.

Gonçalves, B. M. M., Camillo, M. de O., Oliveira, M. P., Carreira, L. G., Moulin, J. C., Neto, H. F., de Oliveira, B. F., Pereira, A. C., & Monteiro, S. N. (2021). Surface treatments of coffee husk fiber waste for effective incorporation into polymer biocomposites. *Polymers*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/polym13193428>

Gong, J., Li, J., Xu, J., Xiang, Z., & Mo, L. (2017). Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs. *RSC Advances*, 7(53), 33486–33493. <https://doi.org/10.1039/c7ra06222b>

Grilli, D., Egea, V., Lama, S. P., Carcaño, D., Allegretti, L., Escudero, M. S., & Arenas, G. N. (2015). Degradación y utilización de la hemicelulosa contenida en especies forrajeras por *Pseudobutyrvibrio ruminis* y *Pseudobutyrvibrio xylanivorans*. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(2), 231–243.

Hielscher Ultrasonics. (1999). Hielscher Ultrasonics Technology. Hielscher Ultrasonics GmbH. Recuperado de <https://www.hielscher.com/es/ultrasonic-homogenizers-for-liquid-processing-3.htm>. (<https://www.hielscher.com/wp-content/uploads/UIP1000hdT-ultrasonicator-dispersion-solid-liquid-25ox333.jpg>).

HRS Heat Exchangers. (2023). Heat Exchangers. HRS Group. Recuperado de <https://www.hrs-heatexchangers.com/es/noticias/la-hidrolisis-termica-impulsa-la-produccion-de-biogas/>. (<https://www.hrs-heatexchangers.com/wp-content/uploads/2022/03/HRS-Unicus-Heat-Exchangers-Thermal-Hydrolysis.jpg>).

Isogai, A., & Bergström, L. (2018). Preparation of cellulose nanofibers using green and sustainable chemistry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 12, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.008>

Jawaid, M., Alothman, O. Y., & Salit, M. S. (2017). Cellulosic Biocomposites: Potential Materials for Future. *Green Energy and Technology*, 0(9783319493817), vii–viii. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49382-4>

Keller, S. (2019). Por qué el papel prospera en un mundo digital. *ChemMatters*, 1–4. <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/highschool/chemmatters/spanishtranslations/cm-april2019-celebrate-paper-spanish.pdf>

Lee, D., & Yoo, B. (2021). Cellulose derivatives agglomerated in a fluidized bed: Physical, rheological, and structural properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.142>

Liu, Y., Ahmed, S., Sameen, D. E., Wang, Y., Lu, R., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2021). A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends in Food Science and Technology*, 112(April), 532–546. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.016>

Microfluidics Corporation, M.I. (2023). Microfluidizer Processors. IDEX: Materials Processing Technologies. Recuperado de <https://www.microfluidics-mpt.com/microfluidizers/pilot-scale-m-110eh>. (<https://www.microfluidics-mpt.com/hubfs/M-110EH-30-001-1-website-1.jpg>).

McNamara, J. T., Morgan, J. L. W., & Zimmer, J. (2015). A molecular description of cellulose biosynthesis. *Annual Review of Biochemistry*, 84, 895–921. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060614-033930>

Molina, A. B., & Flórez, C. J. M. (2020). Biopolímeros como sistemas de bioencapsulación. *Researchgate.Net*, August. (<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19521.17767/1>). (https://www.researchgate.net/profile/Jm-Florez-Castillo/publication/343452469/figure/fig4/AS:921262239014912@1596657442013/Figura-2123-Estructura-de-la-celulosa-fuente-autor_W640.jpg).

Möller, J. (2014). Comparación de los métodos para la determinación de fibra en pienso y en los alimentos. *Dedicated Analytical Solutions*, December, 1–5. <https://docplayer.es/82653469-Comparacion-de-los-metodos-para-la-determinacion-de-fibra-en-pienso-y-en-los-alimentos.html>

Omran, A. A. B., Mohammed, A. A. B. A., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Asyraf, M. R. M., Koloor, S. S. R., & Petrů, M. (2021). Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: A review. *Polymers*, 13(2), 1–30. <https://doi.org/10.3390/polym13020231>

Ramos Cassellis, M. E., Luna Guevara, M. L., Campos Contreras, J. E., Salazar Rojas, V. M., Karina, A., Teutli, L., & Silva, J. L. (2020). Evaluation of cellulase activity of fungi isolated from vanilla beans (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews). *International Journal of Applied Microbiology and Biotechnology research* 8, 33–39. <https://doi.org/10.33500/ijambr.2020.08.004>

Scheller, H. V., & Ulvskov, P. (2010). Hemicelluloses. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 263–289. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>. (https://th.bing.com/th/id/OIP._CexRuPYWv-4nmonuTeniwHaHz?pid=ImgDet&w=156&h=164&c=7).

Sernaqué Aucchuasi, F. A., Huamán mogollón, L. del C., Hugo, P. C., & Chacón, M. E. (2020). Biodegradabilidad de los bioplásticos elaborados a partir de cáscaras de *Mangifera indica* y *Musa paradisiaca*. *Centro de Investigaciones Agropecuarias*, 47(4), 22–31. <http://cagricola.uclv.edu.cu>

Somerville, C. (2006). Cellulose synthesis in higher plants. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 22, 53–78. <https://doi.org/10.1146/annurev.cellbio.22.022206.160206>

Suárez, S. J., Candela, A. M., Henao, J. A., & Bayona, O. L. (2019). EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PRETRATAMIENTO CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO SOBRE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR PARA REMOCIÓN DE LIGNINA TT - Evaluation of the performance of the preteretment with the hydrogen peroxide on sugar cane bagasse for removing lignina. *Iteckne*, 16, 21–28. http://www.scielo.org.co/pdf/itec/v16n1/1692-1798-itec-16-01-21.pdf%0Ahttp://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982019000100021&lang=es. (https://www.researchgate.net/profile/Soleidy-Suarez-Forero/publication/334436704/figure/fig1/AS:780021350285312@1562982990163/ESTRUCTURA-DE-LA-PARED-VEGETAL_W640.jpg).

Ten, E., & Vermerris, W. (2015). Recent developments in polymers derived from industrial lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(24), 1–13. <https://doi.org/10.1002/app.42069>

Terinte, N., Ibbett, R., & Schuster, K. C. (2017). Overview on native cellulose and microcrystalline cellulose I structure studied by X-ray diffraction (WAXD): Comparison between measurement techniques OVERVIEW ON NATIVE CELLULOSE AND MICROCRYSTALLINE CELLULOSE I STRUCTURE STUDIED BY X-RAY DIFFRACTION (. January 2011.

Tian, C., Yi, J., Wu, Y., Wu, Q., Qing, Y., & Wang, L. (2016). Preparation of highly charged cellulose nanofibrils using high-pressure homogenization coupled with strong acid hydrolysis pretreatments. *Carbohydrate Polymers*, 136, 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.09.055>

Wyman, C. E. (1999). Technical Progress, Opportunities, and Commercial Challenges. 189–226.

Yousefian, H., & Rodrigue, D. (2017). Morphological, physical and mechanical properties of nanocrystalline cellulose filled Nylon 6 foams. *Journal of Cellular Plastics*, 53(3), 253–271. <https://doi.org/10.1177/0021955X16651241>

Zambrano, G., Cedeño, C., Garcia, V., & Ulbio, A. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa Use of rice husk (*Oryza sativa*) for the production of cellulose fibres Uso de casca de arroz (*Oryza sativa*) para obtenção de fibras de celulose *Ciencias de nat. Polo Del Conocimiento*, 6(4), 415–437. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2572>

Zeng, J., Tong, Z., Wang, L., Zhu, J. Y., & Ingram, L. (2014). Isolation and structural characterization of sugarcane bagasse lignin after dilute phosphoric acid plus steam explosion pretreatment and its effect on cellulose hydrolysis. *Bioresource Technology*, 154, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.041>

[org/10.1016/j.biortech.2013.12.072](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.072)

Zhao, D., Zhu, Y., Cheng, W., Chen, W., Wu, Y., & Yu, H. (2021). Cellulose-Based Flexible Functional Materials for Emerging Intelligent Electronics. *Advanced Materials*, 33(28), 1–18. <https://doi.org/10.1002/adma.202000619>