

Redefiniendo la celulosa. La rama verde de los nuevos materiales

Miguel Trigo Morán ⁽¹⁾ y Daniel Curbelo Piñero ⁽²⁾

Resumen: La celulosa, el biopolímero más abundante en la naturaleza, está presente en células vegetales y funciona como estructura y red de defensa para las plantas, algas e incluso ciertas bacterias. Esta cadena de glucosa precisa de otros elementos, como aglutinantes, que incrementan sus propiedades mecánicas y químicas, llegando a la sociedad en forma de algodón, cartón o papel. La biosíntesis de celulosa representa un eje clave en la supervivencia y desarrollo del reino vegetal, superando los factores bióticos y abióticos a los que se exponen: todos los tipos de esfuerzos mecánicos, humedad, sequía, depredación y parasitismo, entre otros. El grado de polimerización y la presencia y abundancia de otros grupos químicos la convierten en un material versátil que confiere propiedades personalizables. Representa una potencial alternativa a materiales sintéticos no degradables, aprovechando los desechos de cartón y algodón en paquetería y la industria de la moda. El rediseño de materiales basados en celulosa puede añadir un nivel adicional a la economía circular del algodón y el cartón, permitiendo su uso incluso a nivel doméstico.

El artículo propone una revisión de diseñadores como Nakao, con su producción de piezas de moda, y proyectos de la Universidad de Arte y Diseño de Lausana, con avances conseguidos en la producción de mobiliario y packaging. Estos diseñadores crean nuevos biomateriales de alto rendimiento y muestran cómo pueden integrarse de una forma óptima y eficaz en el flujo de diseño, a través de técnicas como la nanofibrilación, la fabricación digital y la laminación. En este trabajo se analizan cuestiones relativas a las formas de implementación del material, nuevos procesos de mecanización, enfoques metodológicos innovadores, variaciones en la matriz del material, obtención y recolección de la celulosa y prácticas ecológicamente sostenibles.

Palabras clave: Biomateriales - Celulosa - Sostenibilidad - Arquitectura - Polímeros - Nanofibrilación - Biodegradabilidad - Moda - Producto Diseño

[Resúmenes en inglés y en portugués en las páginas 83-84]

⁽¹⁾ **Miguel Trigo Morán** es graduado en Diseño Gráfico y Arte Multimedia por la Universidad Europea de Madrid. Máster en Media & Information Design por la KU Leuven, en Bruselas. Actualmente está cursando el Doctorando en Arquitectura, Diseño, Moda y Sociedad, en la Universidad Politécnica de Madrid. Desarrolla su actividad laboral como docente en la Universidad Europea de Madrid/Campus Creativo, y como diseñador gráfico y director de arte, con proyectos realizados para la Comisión Europea, y para empresas

como 3M, Spotify, Banco Santander, Hikvision y Raytheon Technologies. Su trabajo profesional y a través de agencia ha sido reconocido en selecciones como 50 Talentos, Ideas para un Mundo Mejor y Producto Fresco, y premios como The Drum Awards, European Excellence Awards y EuroPAwards.

⁽²⁾ **Daniel Curbelo Piñero** es Biotecnólogo (Universidad Politécnica de Madrid, España). Máster Internacional en Bioquímica (Universität Bonn, Alemania). Desde 2021 ha participado en diversos proyectos de investigación relacionados con el área de salud (Alergia, tratamiento del Sars-CoV-2, diseño de terapias in silico, estudio de síndromes congénitos, papel de la mitocondria en el envejecimiento y sistema inmune innato). Actualmente, trabaja en el Instituto Max Planck de Biología del Envejecimiento (Max Planck Institute of Biology of Ageing, Alemania).

1. Caracterización fisicoquímica de la celulosa

La celulosa es el biopolímero más abundante en la naturaleza debido a su presencia en la pared celular de plantas, aunque también está presente en bacterias, algas e incluso algunos animales marinos (Abdelhamid y Mathew, 2022; Leppänen *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2022; Rojas Editor, 2016; Ross *et al.*, 1991). Este polisacárido está compuesto por cadenas lineales de D-glucosa a través de un enlace beta 1-4 glucosídico (*Ver Figura 1*). La presencia de este tipo de enlace permite una mayor resistencia a la degradación que otros polisacáridos basados en la glucosa como el almidón (Mohanty *et al.*, 2000). A nivel molecular, las diferentes cadenas de celulosa interactúan entre sí pudiendo formar una estructura cristalina, aumentando su resistencia a la tensión y manteniendo su elasticidad (George y Sabapathi, 2015; Leppänen *et al.*, 2009; Moon *et al.*, 2011; Rojas Editor, 2016). Así, la disposición de las cadenas de celulosa y su asociación con otras microfibras y polisacáridos determina las propiedades químicas y físicas de estructuras como la pared vegetal en plantas superiores (Bhatla y A. Lal, 2018; Edition, 2009).

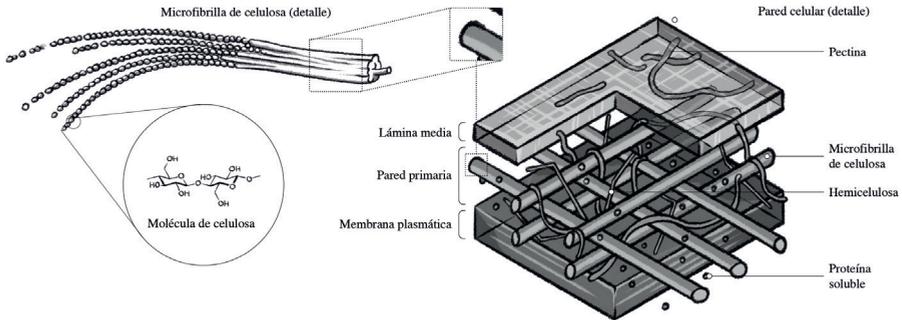


Figura 1. Composición y ordenación de las microfibras de celulosa en la pared celular. Partiendo de moléculas de celulosa se generan cadenas más largas (microfibras de celulosa), estructuras presentes en la pared de las células vegetales que interaccionan con otros compuestos como hemicelulasas, pectinas y otras proteínas (Fuente: © Fotografía de Elaboración propia).

A pesar de ser un polisacárido no ramificado, la celulosa en plantas interacciona con otros componentes como hemicelulasas, pectinas, ligninas o suberinas, incrementando la complejidad y versatilidad de estructuras biológicas como la madera (Leppänen *et al.*, 2009). Estos compuestos son necesarios para hacer frente a factores abióticos y bióticos, como resistencia a la flexión o parásitos vegetales respectivamente (Bhatla y A. Lal, 2018; Edition, 2009; Hashimoto y Kudla, 2011; Taj *et al.*, 2010). Las diferentes propiedades entre productos derivados de la celulosa como la madera blanda y dura, se pueden explicar desde la proporción e interacción entre los diferentes polímeros que los conforman (Leppänen *et al.*, 2009). Algunos de estos polímeros se usan de manera independiente en la industria, como el uso de pectinas como aglutinante, estabilizante o absorbente en alimentos y tratamientos médicos (Choi *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021; Ng y Wang, 2016), ya que las pectinas forman geles cuando se hidratan. Las hemicelulasas se emplean en la industria como adherente para incrementar la resistencia del papel (Rojas Editor, 2016).

1.1. Subtipos de celulosa

Las propiedades químicas y físicas de la celulosa vienen determinadas en gran medida por los enlaces de hidrógeno. Este tipo de interacción molecular débil se encuentra en todos los sistemas biológicos, por ejemplo, en el ADN (Bonchek, 1979; Kumar *et al.*, 2021; Thakur *et al.*, 1997). A pesar de ser un tipo de interacción débil, la suma de los enlaces individuales genera estructuras diversas y resistentes. En la celulosa, el enlace beta 1-4 O-glucosídico permite que se formen enlaces de hidrógeno a nivel intra- e intercatenario, es decir, entre la misma cadena o entre diferentes cadenas, respectivamente, fomentando la

asociación de las cadenas de celulosa en microfibras de alrededor de 300 nm (Choi *et al.*, 2022; Leppänen *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2022; Moon *et al.*, 2011). Estas a su vez se asocian en haces de microfibras de 100 μm para formar fibras de celulosa de diversos tamaños y longitudes. Por ello, las estructuras biológicas exhiben un entramado de fibras de celulosa que se complementan con otros compuestos para superar estas debilidades físicas. Sin embargo, existen diferentes sistemas de enlaces de hidrógeno (Ver Figura 2). La celulosa tipo I, celulosa I o celulosa nativa, presenta 2 enlaces de hidrógeno intracatenarios y 1 enlace intercatenario por unidad de D-glucosa. Uno de los enlaces intracatenarios se encuentra entre el grupo hidroxilo (-OH) del carbono 2 (C2) y el hidroxilo del carbono 6 (C6), mientras que el segundo enlace ocurre entre el hidroxilo del carbono 3 (C3) y el grupo hemiacetal (-O-) del siguiente monómero de glucosa (Aziz *et al.*, 2022; George y Sabapathi, 2015; Li *et al.*, 2021; Moon *et al.*, 2011). El enlace intercatenario ocurre en el hidroxilo del C6 con otras cadenas de celulosa. En la celulosa tipo II, o celulosa II, el enlace intracatenario C2-C6 se pierde y el hidroxilo del C2 pasa a ser intercatenario. Esto provoca que la celulosa II sea más compacta y menos reactiva (Rojas Editor, 2016).

Además, el efecto hidrofóbico, aquel que explica desde la entropía la asociación preferente de moléculas apolares entre sí frente a la interacción apolar-polar, fomenta que la celulosa II tenga un carácter más hidrofóbico. En ambos casos, existen regiones cristalinas y regiones amorfas dentro de la celulosa, caracterizadas por zonas con elevado o reducido grado de ordenación espacial, respectivamente. Aunque la proporción de zonas amorfas en la celulosa II es menor, existe un menor grado de ordenación en los extremos de las microfibras debido a la organización macromolecular de las diferentes unidades (George y Sabapathi, 2015; Moon *et al.*, 2011; Rojas Editor, 2016).

La celulosa I puede transformarse en celulosa II a través de la mercerización, tratamiento común del algodón para mejorar la calidad, brillo y fijación del tinte (Erdal y Hakkarainen, 2022; Kennedy, 1954). Este consiste en un baño en solución alcalina y posterior solución ácida que permite la redefinición de los enlaces de hidrógeno. Otros tratamientos pueden generar otros sistemas de enlaces de hidrógeno, incrementando la versatilidad de la celulosa como biomaterial (Rojas Editor, 2016).

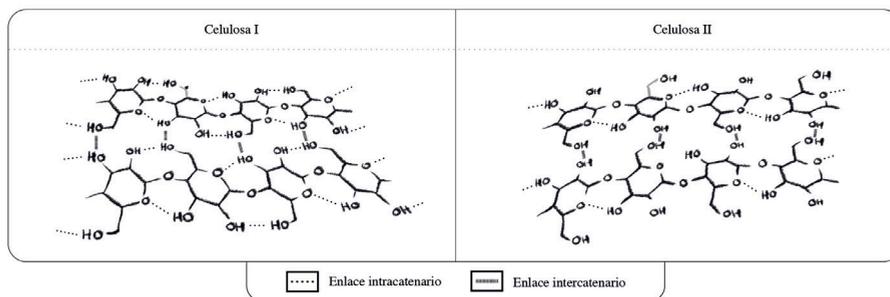


Figura 2. Sistema de enlaces de hidrógeno en vCelulosa I y Celulosa II. Los enlaces intercatenarios se presentan con una línea punteada. Los enlaces intracatenarios con una línea gruesa discontinua (Fuente: ©Adaptado de Bergensträhle-Wohlert *et al.*, *Cellulose and the role of hydrogen bonds: not in charge of everything*).

2. La nanocelulosa y la celulosa nativa

La nanocelulosa ha ganado popularidad en las últimas décadas (Erdal y Hakkarainen, 2022; McNamara *et al.*, 2015). Este polímero se compone de fibras de celulosa donde una de sus dimensiones, *p. ej.*, grosor, está dentro del rango de 1-100 nm. Además de poseer las características de la celulosa, representa un gran material a nivel nanoscópico, con elevada resistencia a la tensión, elasticidad, superficie específica y baja densidad (Abdelhamid y Mathew, 2022; Leppänen *et al.*, 2009; Rojas Editor, 2016). Se puede obtener mediante la hidrólisis de la celulosa nativa, degradando las regiones amorfas en monómeros de glucosa y reduciendo en tamaño las regiones cristalinas a filamentos de 3-5 nm de diámetro o esferoides de nanocristales de celulosa de alrededor 10-100 nm de diámetro (Lu y Hsieh, 2010). Las nanofibras resultantes de la agregación de estos cristales se encuentra en el rango de los 20-50 nm. Además, la nanocelulosa se puede combinar con otros polímeros y/o compuestos para generar una estructura híbrida con propiedades mejoradas. Así, se puede generar nanopapel de celulosa funcionalizado que permite una mayor conductividad eléctrica, una mayor resistencia mecánica o actividad antimicrobiana (Endres, 2019; Jariyasakoolroj *et al.*, 2020; Rojas Editor, 2016).

El algodón es 99% celulosa con elevada cristalización y elevado peso molecular (Bhatla y A. Lal, 2018; Edition, 2009). Estas fibras son alargadas y altamente ordenadas y compactadas, que se disponen de manera concéntrica alrededor de un lumen, un espacio destinado a las células vegetales (*Ver Figura 3*). Otras capas se incluyen en la fibra de algodón, como la cutícula, que contiene componentes como pectinas –un recubrimiento hidrofóbico–. A pesar de tener cierta complejidad, la mayoría de la fibra de algodón es celulosa. La celulosa presente en el algodón se puede mercerizar para aumentar su calidad en la industria textil, por ejemplo, un tacto más sedoso y menos sensible al encogimiento (Rojas Editor, 2016). En comparación, la madera posee entre un 40-50% de celulosa con presencia de lignina y

hemicelulosas que le confieren su deseada resistencia mecánica (Ver Figura 4). La lignina es un conjunto de polímeros orgánicos heterogéneos formados por alcoholes y ácidos, otorgando resistencia y dificultando así la degradación de la madera. Gran parte de la dificultad de la extracción de la celulosa desde productos lignificados se basa en la separación de las ligninas y otros compuestos, como las mencionadas hemicelulosas de la celulosa. Debido a este proceso, se emplea con más frecuencia el algodón como materia prima para la industria textil, mientras que la industria del papel aprovecha restos de madera.

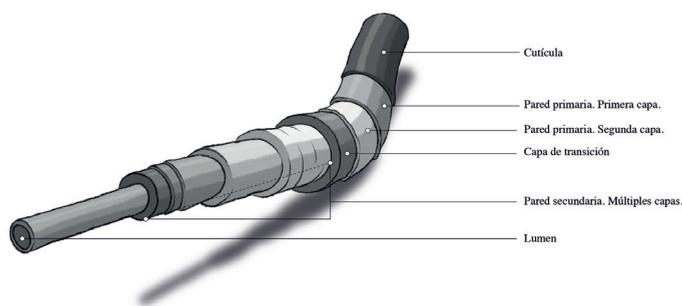


Figura 3. Estructura de la fibra del algodón, incluyendo el lumen, donde se encuentran las células vegetales, la pared primaria en sus diferentes capas, y la cutícula (Fuente: ©Adaptado de *Cotton Fiber Development and Processing: An Illustrated Overview*).

Las cadenas de celulosa se pueden hidrolizar mediante enzimas específicas como las celulasas, presentes en diversos microorganismos y ausentes en humanos, o tratamientos con ácidos fuertes (Blanchette *et al.*, 2024; Erdal y Hakkarainen, 2022; Payne *et al.*, 2015). La disposición de estas microfibrillas de celulosa también determina su degradabilidad y solubilidad, donde la celulosa amorfa permite una hidrólisis más sencilla. Diversos hongos y bacterias pueden descomponer la celulosa en glucosa gracias a diferentes celulasas. Sin embargo, la presencia de pectinas, hemicelulosas y otros compuestos fuerzan a tener mecanismos adicionales para poder acceder a la celulosa, siendo la proporción de lignina uno de los factores más limitantes (Blanchette *et al.*, 2024; Payne *et al.*, 2015). Incluso, existen hongos capaces de degradar solo la celulosa, dejando el entramado de lignina como ventaja ecológica (Payne *et al.*, 2015). A nivel industrial, el procesamiento de la madera es en sí una rama de la ingeniería en la que se integra la obtención de la materia prima, procesamiento y generación de productos derivados, donde se adhiere la industria papelera (Toczyłowska-Mamińska, 2017). Para ello, diferentes procesos que combinan la digestión química y el tratamiento térmico se emplean para generar una pasta de celulosa que pos-

teriormente se prensa para generar el papel u otros productos. Los grandes contaminantes de la industria del papel se encuentran en los efluentes procedentes del tratamiento del papel, ya que contienen diversos químicos, como cloratos, metales pesados y lignina, entre otros, que se deben procesar para evitar su vertido (Toczyłowska-Mamińska, 2017). A pesar de plantear circuitos cerrados en el procesamiento de la pulpa, la necesidad de altas cantidades de agua para el blanqueo sigue siendo un problema medioambiental, especialmente en el contexto actual de calentamiento global.

2.1. Usos tradicionales de la celulosa

Tradicionalmente las plantas se han empleado como fuente principal de la celulosa debido a su accesibilidad. La madera generada a partir de residuos agrícolas o de la industria de la madera son empleados para la obtención de pulpa en la obtención de papel. El algodón representa una fuente natural de rápido crecimiento y gran versatilidad, empleada principalmente en la industria textil. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*) más de 600 millones de toneladas de madera se produjeron para la fabricación de papel y cartón en 2020 (*Forest Product Statistics*, 20) y cerca de 24 millones de toneladas de algodón en 2023, donde el 80% se usa para la confección de ropa y el 15% para mobiliario (Outlook, 2024). Ambas fuentes de materia prima representan un sustento económico para comunidades en desarrollo, especialmente en Asia, siendo India y China las mayores productoras (FAO). De esta manera, se liga la producción con el desarrollo económico y la demanda global, siendo el consumo incrementado en las últimas décadas una posibilidad de crecimiento económico en áreas rurales. A pesar de las implicaciones sociales y medioambientales de la producción de algodón y madera, como la deforestación y la explotación laboral, tanto el algodón como la madera son fuentes claves en la obtención de celulosa (Bhat, 2011; Schweickart, 1989; *The History of Cotton Fabric | A Tale of Trade, Politics and Industry*, 2022).

Sin embargo, existen alternativas con gran interés comercial y ecológico. La celulosa bacteriana presenta un alto grado de pureza con ausencia de compuestos como ligninas, con elevado grado de cristalización, y excelentes propiedades mecánicas (Choi *et al.*, 2022; Ng y Wang, 2016; Ross *et al.*, 1991). A diferencia de las células vegetales, la celulosa bacteriana no forma parte de las estructuras internas de la célula. Este biopolímero se sintetiza fuera de la bacteria para generar un biofilm que confiere ventajas ecológicas, *p. ej.*, flotabilidad para alcanzar zonas enriquecidas en oxígeno (Ruka *et al.*, 2012). Durante la biosíntesis de la celulosa bacteriana, las fibras se encuentran más ordenadas y no interactúan con otros compuestos como en las células vegetales, generando una red altamente cristalina con un procesamiento posterior reducido. Especies como *Gluconacetobacter xylinus* o *Komagataeibacter xylinus* (anteriormente *Acetobacter xylinus*) generan matrices de celulosa flotante que se pueden emplear de manera industrial para la obtención de este biopolímero (Choi *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2024; Ross *et al.*, 1991; Ruka *et al.*, 2012). La celulosa bacteriana absorbe gran cantidad de agua y se adapta a las dimensiones del medio, de manera que se pueden generar hidrogeles con gran variedad de formas para diferentes apli-

caciones, por ejemplo, filtros, conductores en sistemas electrónicos o textiles. Además, este biomaterial es altamente biocompatible, pudiendo generar piel o cartílago artificial para el tratamiento de quemaduras, reconstrucciones u otros procedimientos médicos (Abdelhamid y Mathew, 2022). Además, el uso del cultivo bacteriano permite reducir el uso de suelo agrario, los costes del transporte y el procesamiento de la materia prima. En estos sistemas, el inóculo se cultiva en un medio líquido basado en carbohidratos de bajo peso molecular, *p. ej.*, D-glucosa, para generar un hidrogel de celulosa laminado, accesible para cualquier laboratorio de biología estándar. El recipiente del medio de cultivo puede adoptar diferentes formas en base a una aplicación posterior, incrementando su aplicabilidad como producto. Además, la combinación de nanocelulosa bacteriana con otros polímeros como polipirrol puede generar pieles electrónicas (*skin electronics*), piezas electrónicas que permiten suplir funciones de la piel (Li *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022).

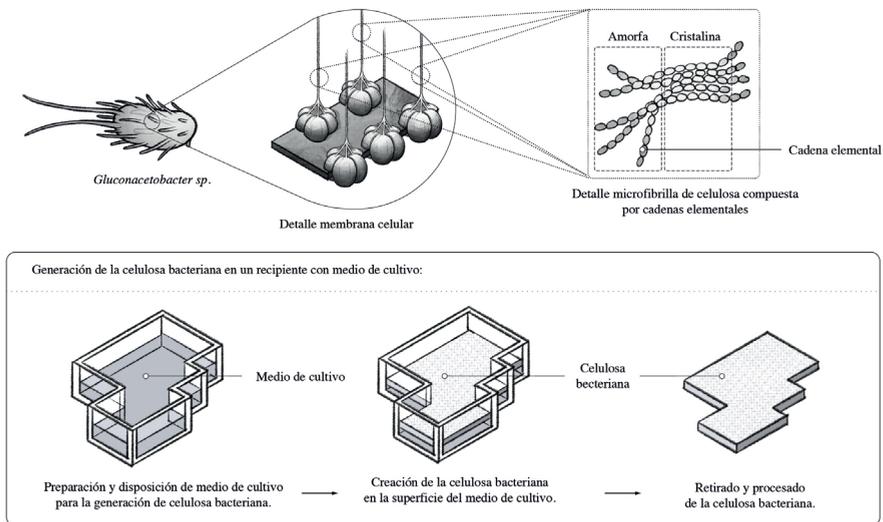


Figura 4. Detalle de la membrana celular de la bacteria y el posterior uso de la síntesis de celulosa bacteriana en la creación de láminas de celulosa. Estas láminas se adaptan al recipiente en que se hayan cultivado los microorganismos, lo que ofrece una opción que minimiza el desecho de material (Fuente: ©Fotografía: Elaboración propia).

3. Nuevas aplicaciones industriales

La celulosa representa un material de origen biológico con gran interés, tanto artístico como industrial. Es por ello que diversas organizaciones e instituciones han centrado diferentes proyectos en aprovechar el potencial que este polímero ofrece. Esta sección recoge diferentes aplicaciones de la celulosa, tanto en el mundo del arte como a nivel comercial.

3.1. Pinturas y barnices

El uso de la celulosa en la industria de los recubrimientos, adhesivos y pinturas se centra en su utilización como agente mejorador de sus características y su apreciación estética (Zhou *et al.*, 2014). En concreto, este biomaterial permite una mejor dispersión y una menor aglomeración de los compuestos químicos, como pigmentos, gracias a los enlaces de hidrógeno (Nishiyama, 2017). Además, al reducir el proceso de secado se facilita una fijación más homogénea del recubrimiento en la superficie deseada (Nechyporchuk *et al.*, 2018). Por otro lado, la celulosa en bajas concentraciones se usa como espesante y estabilizador, ya que no interfiere negativamente con otros compuestos presentes en la disolución, convirtiéndose en un aditivo de gran interés industrial (Imchalee *et al.*, 2021).

Un ejemplo de la integración de la celulosa en pinturas y barnices se puede observar en la empresa Looote. La marca Hecelloser® pone a disposición compuestos derivados de la celulosa procedentes de madera y del algodón, y destaca su uso como disipador y espesante de pinturas. Otras entidades como AkzoNobel, empresa paraguas de marcas como Titán, Bruguer y Procolor, han mostrado su interés por la incorporación de la celulosa proveniente de la remolacha azucarera, incluyendo programas start-up como Imagine Chemistry, donde animan a la investigación de alternativas con base de celulosa frente al uso de sintéticos.

3.2. Diseño de moda

En 2019 la Conferencia de la Organización de Naciones Unidas identificó la moda como la segunda industria más contaminante en el mundo (El impacto de la producción textil y de los residuos en el medio ambiente | Temas | Parlamento Europeo, 2024). Además del impacto hídrico que la industria textil genera, existen problemas adyacentes como la contaminación del entorno por medio de fibras plásticas y tintes, y una emisión de carbono responsable del 10% del total a nivel mundial. En contraposición, la celulosa bacteriana prescinde del uso del suelo agrícola y representa una alternativa con menor huella de carbono (Hasanin *et al.*, 2023).

En la moda, la celulosa bacteriana permite la confección inmediata de prendas de cualquier dimensión o forma, reduciendo el coste del material y los residuos generados (Chan *et al.*, 2018). Esto no solo aumenta su atención como material sostenible, sino que lo convierte en una fuente accesible, superando la distancia entre el productor y la materia prima (Kääriäinen, 2019). Así, reconocidas modistas como Suzanne Lee crean proyectos como

BioCouture, que se desvincula del algodón y emplea otras fuentes, como la celulosa bacteriana, para generar prendas más sostenibles y preparadas para el futuro medioambiental. A nivel comercial, empresas como ScobyTec busca generar materiales basados en nanocelulosa bacteriana. De esta manera, se reemplazaría gradualmente el uso de polímeros procedentes de fuentes no renovables tanto en la moda como en la industria automovilística. En el empleo de la celulosa procesada con fabricación digital destacamos el trabajo de Jum Nakao que presentó por primera vez, en el verano de 2005, una colección de prendas realizadas con celulosa en forma de papel (*Paper Art Fashion*, Jum Nakao–Artwear, 2016). Estos trajes y vestidos estarían confeccionados con corte láser y técnicas de doblado y atado. Este proyecto demuestra la versatilidad del material cuando se une con otras formas de creación; así como los acabados que se pueden conseguir a través de una buena manipulación. En esta exhibición se empleó más de una tonelada de material para la confección de las prendas, contrastando con el tiempo limitado para disfrutar de las piezas. Al final de la exhibición, las prendas fueron desgarradas deliberadamente. Nakao busca así la crítica de uso del papel, la fugacidad y el materialismo asociado a este biomaterial, posicionando el concepto de arte por encima del uso pragmático.

3.3. Arquitectura

La celulosa bacteriana también puede emplearse a mayor escala, pudiendo generar estructuras y aislamiento en fachadas, tejados y mobiliario, entre otros (Massoud *et al.*, 2024). A pesar de que este sector necesita la estandarización de métodos de producción, este biomaterial es sostenible, biodegradable y con propiedades compatibles para la construcción y la producción industrial (Zhong, 2020). Además, se puede combinar con otros materiales o compuestos para así ampliar su aplicabilidad, al mejorarse sus características frente a esfuerzos concretos (Massoud *et al.*, 2024).

En su uso como aislante térmico y acústico, la celulosa puede ser una alternativa a las espumas artificiales formuladas con polietileno o poliestireno, como componente base (Lopez Hurtado *et al.*, 2016). Esta forma de la celulosa se extrae del reciclaje de papelería impresa, sometida a procesos de triturado y lavado, que otorga homogeneidad a la mezcla y permite tratamientos con otros compuestos como las sales de boro o el sulfato de amonio. CIMA (*Cellulose Insulation Manufacturers Association*) señala ciertas ventajas en comparación con el uso de espumas, entre las que destaca un ahorro de los costes en la mayoría de las intervenciones, reducción del tiempo de aplicación al poder aplicarse de manera continuada y sin interrupciones. Además, se mejora en la reducción de ruido y se puede tratar con retardantes de fuego, lo que ralentizaría, e incluso frenaría, el avance de un incendio en la edificación (*How To Update Insulation In Walls Of Old Homes-Cellulose Insulation Manufacturers Association*, 2024).

En un artículo publicado por SLOW Studio, empresa española con más de diez años de experiencia en la generación de estrategias arquitectónicas relacionadas con un estilo de vida sostenible, también se señala la celulosa tratada con aditivos por sus funciones insecticidas y fungicidas, así como aislante térmico capaz de anular los cambios bruscos en el interior de las viviendas.

Por otro lado, el uso de celulosa en sistemas de liberación de peso cobra gran importancia en la construcción de fachadas. El sistema Passivhaus, desarrollado por *Knauf Insulation*, muestra cómo este material vegetal puede combinarse con acero, yeso y/o lana mineral, para generar un producto que reduce en un 27% el tiempo de construcción, y en aproximadamente un 75% el peso, de la fachada si se compara con la construcción de fachada a partir de ladrillo cerámico.

3.4. Diseño de producto

Esta mención del campo del Diseño ha encontrado en la celulosa una alternativa biodegradable al uso del plástico. Como ejemplo destacamos el proyecto Under Pressure Solutions, realizado por la Escuela Cantonal de Arte y Diseño de Lausana, ÉCAL (por sus siglas en francés: École cantonale d'art de Lausanne) presentó en abril del año 2024, durante la Semana del Diseño de Milán, consistente en una colección de objetos construida a partir de láminas de celulosa comprimidas (ÉCAL's *Pop-up Sponge Furniture Grows to Ten Times Its Size*). Este material, que busca una optimización en los procesos de logística y transporte, es capaz de aumentar hasta diez veces su tamaño en contacto con el agua, volviéndose flexible y moldeable. Tras la deshidratación del producto, este pierde peso y aumenta su rigidez, siendo capaz de aguantar el peso de una persona al aplicarse en diseños de sillas y taburetes. Cuando llega la hora del descarte, puede devolverse al medio en el que comenzará el proceso de descomposición que se prolongará durante algunos meses.

Siendo estudiante de la misma escuela, la diseñadora Anna Piasek genera un envase de inspiración asiática con capacidad de división tipo bento (*Anna Piasek Makes Bento-Style Cellulose Packaging for Takeaway Food*). Este diseño, realizado con fibras de celulosa, está adaptado para contener alimentos en estado líquido y sólido. La solución de Piasek muestra una reinterpretación de los actuales contenedores plásticos desechables a través de un material capaz de degradarse en un periodo aproximado de dos meses. El tratamiento a base de sustancias de origen vegetal permite que este contenedor, producido a través del prensado con un molde de metal y en un primer momento poroso, presente propiedades impermeables y seguras para la conservación de los alimentos. La rigidez del material permite un juego de anclajes que mantiene los alimentos separados de forma estanca, lo cual da como resultado un recipiente con hasta diez configuraciones diferentes y capacidad para albergar entre cuatro y ocho platos.

Conclusiones

A pesar de su extenso uso a lo largo de los años, la celulosa representa un material con un potencial no totalmente explorado. El estudio molecular de la celulosa ha permitido entender en mayor profundidad la interacción entre cadenas, pudiendo desarrollar diferentes tipos de celulosa con características distintivas. Esto no solo permite tratar de manera más eficiente la celulosa nativa para generar materiales de mayor calidad, sino que ha fo-

mentado la búsqueda de otras fuentes de materia prima, buscando una mayor conciliación entre la producción de celulosa y el medio ambiente. Como alternativa, la nanocelulosa bacteriana ha cosechado un gran interés en los últimos años debido a su elevada ordenación, su fácil extracción y reducido procesamiento, eliminando gran parte de las complicaciones asociadas a la extracción de celulosa desde restos lignocelulósicos. Además, la nanocelulosa bacteriana permite eliminar el uso del suelo agrario y traslada la producción a un entorno más cercano. De esta manera, se permite una mayor colaboración con artistas que elevan la celulosa a un nivel no solo productivo. También diversas empresas han buscado usos adicionales de la celulosa, mejorando propiedades de productos actuales o generando nuevos usos de la celulosa.

Es importante dimensionar el alcance de la ciencia de la celulosa. No solo posee una historia asociada al desarrollo de comunidades aisladas, sino es uno de los biomateriales más esenciales de la sociedad actual. La celulosa es la base indispensable en la industria de la moda, el papel y la paquetería, piezas claves para el funcionamiento de nuestra economía. Asociado, hay una creciente cantidad de información e investigación para aliviar la dependencia de fuentes tradicionales. Por tanto, este artículo solo pretende introducir a las múltiples posibilidades, con un especial interés por sus características moleculares.

Referencias bibliográficas.

- Abdelhamid, H. N., & Mathew, A. P. (2022). A Review on Cellulose-based Materials for Biomedicine. *Preprints, January*, 2022010035.
- Anna Piasek makes Bento-style cellulose packaging for takeaway food. (2019). Retrieved 9 October 2024, from
- Aziz, T., Farid, A., Haq, F., Kiran, M., Ullah, A., Zhang, K., Li, C., Ghazanfar, S., Sun, H., Ullah, R., Ali, A., Muzammal, M., Shah, M., Akhtar, N., Selim, S., Hagagy, N., Samy, M., & Al Jaouni, S. K. (2022). A Review on the Modification of Cellulose and Its Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 15). MDPI.
- Bhat, B. A. (2011). Socioeconomic Dimensions of Child Labor in Central Asia. *Problems of Economic Transition*, 54(1), 84–99 (Disponible en: <https://doi.org/10.2753/pet1061-1991540108>).
- Bhatla, S. C., & A. Lal, M. (2018). Plant Physiology, Development and Metabolism. In *Plant Physiology, Development and Metabolism* (Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1>).
- Blanchette, R. A., Nilsson, T., Daniel, G., & Abad, A. (2024). *6 Biological Degradation of Wood* (Vol. 12). UTC (Disponible en: <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>).
- Bonchek, L. (1979). Downloaded from nejm.org at YALE MEDICAL LIBRARY on September 26, 2013. From the NEJM Archive. Copyright © 2010 Massachusetts Medical Society. All rights reserved. *The New England Journal of Medicine*, 301(1), 44–45.
- Chan, C. K., Shin, J., & Jiang, S. X. K. (2018). Development of Tailor-Shaped Bacterial Cellulose Textile Cultivation Techniques for Zero-Waste Design. *Clothing and Textiles Research Journal*, 36(1), 33–44 (Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0887302X17737177>).

- Choi, S. M., Rao, K. M., Zo, S. M., Shin, E. J., & Han, S. S. (2022). Bacterial Cellulose and Its Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 6). MDPI (Disponible en: <https://doi.org/10.3390/polym14061080>).
- ÉCAL's pop-up sponge furniture grows to ten times its size (2024). Retrieved 9 October 2024, from (Disponible en: <https://www.dezeen.com/2024/04/24/ecal-sponge-furniture-ups-milan-design-week/>)
- Edition, S. (2009). Plant physiological ecology. In *Choice Reviews Online* (Vol. 46, Issue 08). (Disponible en: <https://doi.org/10.5860/choice.46-4432>).
- El impacto de la producción textil y de los residuos en el medio ambiente | Temas | Parlamento Europeo*, (2024). Retrieved 3 October 2024 (Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20201208STO93327/el-impacto-de-la-produccion-textil-y-de-los-residuos-en-el-medio-ambiente>).
- Endres, H. J. (2019). Bioplastics. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 166, 427–468 (Disponible en: https://doi.org/10.1007/10_2016_75).
- Erdal, N. B., & Hakkarainen, M. (2022). Degradation of Cellulose Derivatives in Laboratory, Man-Made, and Natural Environments. In *Biomacromolecules* (Vol. 23, Issue 7, pp. 2713–2729). American Chemical Society (Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c00336>).
- Forest product statistics*, (2018). Retrieved 9 October 2024 (Disponible en: <https://www.fao.org/forestry-fao/statistics/80938/en/>).
- George, J., & Sabapathi, S. N. (2015). Cellulose nanocrystals: Synthesis, functional properties, and applications. *Nanotechnology, Science and Applications*, 8, 45–54 (Disponible en: <https://doi.org/10.2147/NSA.S64386>).
- Hasanin, M. S., Abdelraof, M., Hashem, A. H., & El Saied, H. (2023). Sustainable bacterial cellulose production by *Achromobacter* using mango peel waste. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 1–12 (Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02031-3>).
- Hashimoto, K., & Kudla, J. (2011). Calcium decoding mechanisms in plants. *Biochimie*, 93(12), 2054–2059 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2011.05.019>).
- How To Update Insulation In Walls Of Old Homes - Cellulose Insulation Manufacturers Association*. Retrieved 9 October 2024 (Disponible en: <https://cellulose.org/how-to-update-insulation-in-walls-of-old-homes/>).
- Imchalee, N., Meesupthong, R., Torgbo, S., & Sukyai, P. (2021). Cellulose nanocrystals as sustainable material for enhanced painting efficiency of watercolor paint. *Surfaces and Interfaces*, 27 (January), 101570 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101570>).
- Jariyasakoolroj, P., Leelaphiwat, P., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Advances in research and development of bioplastic for food packaging. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5032–5045 (Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9497>).
- Kääriäinen, P. (2019). Towards Sustainable Textile Materials: Potential pathways and dialogues between disciplines. *Nordes 2019: Who Cares?*, 1(8) (Disponible en: <https://doi.org/10.21606/nordes.2019.010>).
- Kennedy, J. W. (1954). Principles of Polymer Chemistry. In *Journal of the American Chemical Society* (Vol. 76, Issue 10) (Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ja01639a091>).
- Kumar, P., Agarwal, P. K., & Cuneo, M. J. (2021). On the Case of the Misplaced Hydrogens. *ChemBioChem*, 22(2), 288–297 (Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cbic.202000376>).

- Leppänen, K., Andersson, S., Torkkeli, M., Knaapila, M., Kotelnikova, N., & Serimaa, R. (2009). Structure of cellulose and microcrystalline cellulose from various wood species, cotton and flax studied by X-ray scattering. *Cellulose*, 16(6), 999–1015 (Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10570-009-9298-9>).
- Li, T., Chen, C., Brozena, A. H., Zhu, J. Y., Xu, L., Driemeier, C., Dai, J., Rojas, O. J., Isogai, A., Wågberg, L., & Hu, L. (2021). Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. In *Nature* (Vol. 590, Issue 7844, pp. 47–56). Nature Research (Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>).
- Liu, W., Liu, K., Du, H., Zheng, T., Zhang, N., Xu, T., Pang, B., Zhang, X., Si, C., & Zhang, K. (2022). Cellulose Nanopaper: Fabrication, Functionalization, and Applications. In *Nano-Micro Letters* (Vol. 14, Issue 1). Springer Science and Business Media B.V. (Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00849-x>).
- Lopez Hurtado, P., Rouilly, A., Vandenbossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*, 96, 170–177 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.031>).
- Lu, P., & Hsieh, Y. Lo. (2010). Preparation and properties of cellulose nanocrystals: Rods, spheres, and network. *Carbohydrate Polymers*, 82(2), 329–336 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.073>).
- Massoud, P., AbouSeada, N., M.Saada, A., & Zolfakkar, M. (2024). Creating sustainable and flexible architectural skin with microbial cellulose-based material: synthesis and mechanical characterization. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, 0123456789 (Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s43995-024-00068-y>).
- McNamara, J. T., Morgan, J. L. W., & Zimmer, J. (2015). A molecular description of cellulose biosynthesis. In *Annual Review of Biochemistry* (Vol. 84, pp. 895–921). Annual Reviews Inc. (Disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060614-033930>).
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. In *Macromolecular Materials and Engineering* (Vols 276–277, pp. 1–24) (Disponible en: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1<::AID-MAME1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<::AID-MAME1>3.0.CO;2-W)).
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 40, Issue 7) (Disponible en: <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>).
- Nechyporchuk, O., Kolman, K., Bridarolli, A., Odlyha, M., Bozec, L., Oriola, M., Campo-Francés, G., Persson, M., Holmberg, K., & Bordes, R. (2018). On the potential of using nanocellulose for consolidation of painting canvases. *Carbohydrate Polymers*, 194(January), 161–169 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.020>).
- Ng, F. M. C., & Wang, P. W. (2016). Natural Self-grown Fashion From Bacterial Cellulose: A Paradigm Shift Design Approach In Fashion Creation. *Design Journal*, 19(6), 837–855 (Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14606925.2016.1208388>).
- Nishiyama, Y. (2017). *Molecular interactions in nanocellulose assembly Subject Areas*.XX
- Outlook, O. A. (2024). *Chapter 10: Cotton. OECD-FAO AGRICULTURAL OUTLOOK 2024-2033*. 212–222 (Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0047>).
- Paper Art Fashion from Jum Nakao – Artwear*, (2016). Retrieved 9 October 2024 (Disponible en: <https://artwearblog.wordpress.com/2016/02/18/paper-art-fashion-from-jum-nakao/>).

- Payne, C. M., Knott, B. C., Mayes, H. B., Hansson, H., Himmel, M. E., Sandgren, M., Ståhlberg, J., & Beckham, G. T. (2015). Fungal cellulases. *Chemical Reviews*, 115(3), 1308–1448 (Disponible en: <https://doi.org/10.1021/cr500351c>).
- Rodrigues, D. M., da Silva, M. F., de Mélo, A. H. F., Carvalho, P. H., Baudel, H. M., & Goldbeck, R. (2024). Sustainable synthesis pathways: Bacterial nanocellulose from lignocellulosic biomass for circular economy initiatives. *Food Research International*, 192(July) (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114843>).
- Rojas Editor, O. J. (2016). *Cellulose Chemistry and Properties: Fibers, Nanocelluloses and Advanced Materials* (Disponible en: <http://www.springer.com/series/12>).
- Ross, P., Mayer, R., & Benziman, M. (1991). Cellulose biosynthesis and function in bacteria. *Microbiological Reviews*, 55(1), 35–58 (Disponible en: <https://doi.org/10.1128/mr.55.1.35-58.1991>).
- Ruka, D. R., Simon, G. P., & Dean, K. M. (2012). Altering the growth conditions of *Glucanacetobacter xylinus* to maximize the yield of bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 89(2), 613–622 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.03.059>).
- Schweickart, D. (1989). On the Exploitation of Cotton, Corn and Labor. *Canadian Journal of Philosophy*, 19(sup1), 281–297 (Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00455091.1989.10716801>).
- Taj, G., Agarwal, P., Grant, M., & Kumar, A. (2010). MAPK machinery in plants: Recognition and response to different stresses through multiple signal transduction pathways. *Plant Signaling and Behavior*, 5(11), 1370–1378 (Disponible en: <https://doi.org/10.4161/psb.5.11.13020>).
- Thakur, B. R., Singh, R. K., & Handa, A. K. (1997). Chemistry and Uses of Pectin - A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37(1), 47–73 (Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10408399709527767>).
- The history of cotton fabric | A tale of trade, politics and industry*, (2022). Retrieved 3 October 2024 (Disponible en: https://sanvt.com/blogs/journal/the-history-of-cotton-fabric?srsltid=AfmBOortS_3LYNMU_I-8RGr3U1bfn05k9eRZQfsqReKpskZUmAP80n).
- Toczyłowska-Mamińska, R. (2017). Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(April), 764–772 (Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021>).
- Zhong, C. (2020). Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8(December), 1–19 (Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.605374>).
- Zhou, D., Tang, Y., Zhang, N., Zhang, J., & Liu, D. (2014). Effect of various cellulose derivatives on the properties of pigment coatings: A comparative study. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 9(1), 305–315.

Abstract: Cellulose, the most abundant biopolymer in nature, is present in plant cells and functions as a structure and defence network for plants, algae and even certain bacteria. This glucose chain requires other elements, such as binders, which increase its mechanical and chemical properties, reaching society in the form of cotton, cardboard or paper. Cellulose biosynthesis represents a key axis in the survival and development of the plant kingdom,

overcoming the biotic and abiotic factors to which it is exposed: all types of mechanical stress, humidity, drought, predation and parasitism, among others. The degree of polymerisation and the presence and abundance of other chemical groups make it a versatile material that confers customisable properties. It represents a potential alternative to non-degradable synthetic materials, making use of cardboard and cotton waste in packaging and the fashion industry. The redesign of cellulose-based materials can add an additional layer to the circular economy of cotton and cardboard, allowing their use even at the household level. The article proposes a review of designers such as Nakao, with its production of fashion pieces, and projects at the Lausanne University of Art and Design, with advances made in the production of furniture and packaging. These designers create new high-performance biomaterials and show how they can be optimally and efficiently integrated into the design flow, through techniques such as nanofibrillation, digital fabrication and lamination. This paper discusses issues related to material implementation forms, new machining processes, innovative methodological approaches, variations in the material matrix, cellulose sourcing and harvesting, and ecologically sustainable practices.

Keywords: Biomaterials - Cellulose - Sustainability - Architecture - Polymers - Nanofibrillation - Biodegradability - Fashion - Product - Design

Resumo: A celulose, o biopolímero mais abundante na natureza, está presente nas células vegetais e funciona como estrutura e rede de defesa para plantas, algas e até mesmo algumas bactérias. Essa cadeia de glicose requer outros elementos, como aglutinantes, que aumentam suas propriedades mecânicas e químicas, chegando à sociedade na forma de algodão, papelão ou papel. A biossíntese da celulose representa um eixo fundamental para a sobrevivência e o desenvolvimento do reino vegetal, superando os fatores bióticos e abióticos aos quais está exposta: todos os tipos de estresse mecânico, umidade, seca, predação e parasitismo, entre outros. O grau de polimerização e a presença e abundância de outros grupos químicos o tornam um material versátil que confere propriedades personalizáveis. Ela representa uma alternativa em potencial para materiais sintéticos não degradáveis, fazendo uso de resíduos de papelão e algodão em embalagens e no setor de moda. O redesenho de materiais à base de celulose pode acrescentar uma camada adicional à economia circular do algodão e do papelão, permitindo seu uso até mesmo em nível doméstico. O artigo propõe uma análise de designers como Nakao, com sua produção de peças de moda, e projetos da Universidade de Arte e Design de Lausanne, com avanços feitos na produção de móveis e embalagens. Esses designers criam novos biomateriais de alto desempenho e mostram como eles podem ser integrados de forma otimizada e eficiente ao fluxo de design, por meio de técnicas como nanofibrilação, fabricação digital e laminação. Este artigo discute questões relacionadas a formas de implementação de materiais, novos processos de usinagem, abordagens metodológicas inovadoras, variações na matriz do material, fornecimento e colheita de celulose e práticas ecologicamente sustentáveis.

Palavras-chave: Biomateriais - Celulose - Sustentabilidade - Arquitetura - Polímeros - Nanofibrilação - Biodegradabilidade - Moda - Produto - Design