

# GESTIÓN DE OPERACIONES

---

# INDUSTRIALES

---



Esta obra está publicada bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
TRUJILLO



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
TRUJILLO, PERÚ

## CELLULOSE NANOPARTICLES: SYSTEMATIC REVIEW

Segundo Rafael Alfaro Flores<sup>1</sup>; Marjory Brisset Álvarez Quiroz<sup>1\*</sup>;  
Juan Emanuel Asato Cerna<sup>1</sup>; Joe Alexis González Vásquez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

\*Autor correspondiente: [t053500120@unitru.edu.pe](mailto:t053500120@unitru.edu.pe)

Fecha de recepción: 29.09.2023    Fecha de aceptación: 12.12.2023

ORCID de Autores:

S. R. Alfaro Flores

<https://orcid.org/0009-0006-1712-7464>

M. B. Álvarez Quiroz

<https://orcid.org/0009-0005-3611-2295>

J. E. Asato Cerna

<https://orcid.org/0009-0000-8823-2794>

J. A. González Vásquez

<https://orcid.org/0000-0001-7816-0977>

---

### ABSTRACT

The demand of the population requires the reduction of products that affect the environment, which is why the transition to ecological materials is sought, through Nanotechnology. Nanocellulose is a nanostructural material obtained from plant cellulose. Nanocellulose synthesis means breaking down cellulose into individual fibers at the nanometer scale, resulting in unique mechanical and chemical characteristics. The synthesis of nanocellulose can be carried out basically by hydrolysis processes. This method allows cellulose fibers to be separated into much smaller particles known as cellulose nanofibers (CNF), nanocrystals (CNC) or bacterial nanocellulose (BNC). On the other hand, it is shown that the mechanical characteristics of nanocellulose have high mechanical resistance and are stronger than many conventional materials, such as steel. This chemical versatility allows nanocellulose to tailor its characteristics to specific applications. The evaluation of the characteristics of nanocells is carried out using technologies such as transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction. Through this systematic review, the following were analyzed: synthesis, properties, morphology, characterization methods and the applications that can be given to this new size of materials.

**Keywords:** nanocellulose, characterization, nanofibers, nanocells, compatibility.

---

---

# NANOPARTÍCULAS DE CELULOSA: REVISIÓN SISTEMÁTICA

---

## RESUMEN

La demanda de la población exige la reducción de productos que afectan al ambiente, por eso se busca la transición a materiales ecológicos, mediante la Nanotecnología. La nanocelulosa es un material nanoestructural obtenido a partir de la celulosa de las plantas. La síntesis de nanocelulosa significa descomponer la celulosa en fibras individuales a escala nanométrica, lo que da como resultado características mecánicas y químicas únicas. La síntesis de nanocelulosa se puede ejecutar básicamente por procesos de hidrólisis. Este método permite separar las fibras de celulosa en partículas mucho más pequeñas conocidas como nanofibras de celulosa (CNF), nanocristales (CNC) o nanocelulosa bacteriana (BNC). Por otro lado, se demuestra que las características mecánicas de la nanocelulosa tienen una alta resistencia mecánica y son más fuertes que muchos materiales convencionales, como el acero. Esta versatilidad química permite que la nanocelulosa adapte sus características a aplicaciones específicas. La evaluación de las características de las nanocélulas se realiza utilizando tecnologías como la microscopía electrónica transmisión (TEM), la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X. Mediante esta revisión sistemática, se analizaron: síntesis, propiedades, morfología, métodos de caracterización y las aplicaciones que se les puede dar a este tamaño nuevo de materiales.

**Palabras clave:** nanocelulosa, caracterización, nanofibras, nanocélulas, compatibilidad.

---

## 1. Introducción

La nanotecnología ha ido en avance con el objetivo de controlar estructuras y morfología para potenciar y encontrar propiedades que simplifiquen los sistemas al nivel macro que hoy utilizamos en las diferentes industrias. La necesidad de productos sostenibles y de base biológica hace popular los materiales de origen natural ya que en la actualidad la tecnología va adentrándose en nuevos términos positivos como la sostenibilidad, biodegradabilidad y naturaleza renovable. Así es cómo nace la popularidad del estudio de la celulosa. La nanocelulosa es un nanomaterial celulósico versátil que se puede utilizar en muchas aplicaciones áreas [1]. Es un biopolímero muy abundante y biodegradable, tiene una composición del 35-50% de lignocelulosa debido a su riqueza en grupos hidroxilo y átomos de hidrógeno enlazados fuertemente [2]. Se le atribuye altos valores de resistencia mecánica, distintas propiedades ópticas y baja toxicidad. La mayoría de estudios demuestran que la nanocelulosa puede aplicarse como refuerzo para materiales compuestos de baja densidad y transparentes, mejorando sus propiedades mecánicas y térmicas. Aunque este proceso aún no está explicado a detalle. Al respecto, es muy importante entender la estructura y propiedades fisicoquímicas de la nanocelulosa, especialmente en términos de modificar sus propiedades funcionales para desarrollar sus aplicaciones potenciales [2]. Por ejemplo, el refinado mecánico severo de pulpas altamente purificadas da como resultado una fibra fibrilada, esta forma de celulosa con anchos de fibrillas del mismo orden de magnitud que la celulosa microfibrillas en la pulpa original. Esta celulosa microfibrilada (MFC) tiene más de una estructura de red que los CNC y a menudo forma geles en agua incluso a bajas concentraciones (<1% en peso) [3].

En la mayoría de casos se hace uso del término microfibrillas o las conocidas nanofibras de celulosa bacteriana para diferenciar otros compuestos derivados de esta pulpa. Así es como la nanocelulosa tiene infinitas fuentes de extracción y un comportamiento distintivo. La preparación de nanocelulosa da como resultado geles o suspensiones acuosas que puede necesitar secarse en una fibra y película o convertirse de otra manera en una forma más útil para reforzar termoestables. La fuerte tendencia de la nanocelulosa a formar puentes de hidrógeno puede generar desafíos para redispersarlos si se secan, pero también puede resultar en bastante películas fuertes y rígidas que se pueden utilizar en compuestos laminados [4]. La nanocelulosa es un material hidrofílico, lo que complica la dispersión y adhesión a algunos polímeros termoestables produciendo hinchazón durante la fabricación del material.

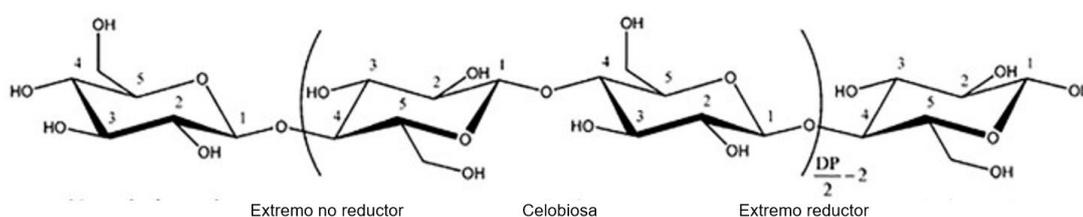


Figura 1. Estructura de una molécula de celulosa.[5]

Otra presentación de la nanocelulosa (NC) son los nanocristales en aplicaciones como la fabricación de papel, la perforación y cementación de petróleo y gas, sistemas de almacenamiento de energía, sensores y biosensores, que han sido ampliamente revisado en los últimos años. El objetivo de esta revisión es hacer un breve resumen sobre los estudios de las nanocelulosas, con especial atención a los CNC, así como sus aplicaciones recientes. Se presentan materias primas, propiedades y funcionalización. Retos importantes relacionados con su producción y nuevos se abordan las direcciones [7]. La investigación reciente sobre el uso de nanocelulosa con especial énfasis en nanocompositos, emulsificantes médicos, pickering, adhesivos para madera, adsorción, aplicaciones de separación, descontaminación y filtración, para proporcionar a los lectores una visión general completa de los avanzados ciencia e ingeniería de emergentes basados en nanocelulosa materiales y usos.

## 2. Propiedades

Como sabemos la celulosa es uno de los biomateriales proveniente de los polisacáridos, este es eficiente en diferentes campos de la ciencia, ya que la celulosa se distingue por ser un material ecológico, no es tóxico y además es biodegradable, principalmente porque se encuentran en gran cantidad en nuestro planeta [10]. La nanocelulosa (NCL) tiene diversas peculiaridades innatas, como una excelente resistencia mecánica, alto módulo de Young, una muy buena resistencia a la tracción y bajo coeficiente de expansión térmica, una elevada relación superficie/volumen, y alta área superficial [23]. Además, se destaca principalmente por su morfología única, por ello, ha tenido una gran acogida en diversos campos, incluso en las aplicaciones de construcción, ya que están hechos de recursos forestales y agrícolas renovables [10].

En cuanto a los nanocristales de celulosa (CNC) están resaltando demasiado en diversos tipos de aplicaciones debido a sus mayores y mejoradas propiedades físicas, como su baja densidad y gran relación de aspecto, en cuanto a sus propiedades químicas, destaca por ser muy funcional en la superficie y posee un alto módulo de elasticidad axial. Estos Nanocristales de celulosa se deriva gracias a un método térmico de fibras de celulosa [24]. También es importante mencionar a la celulosa nanofibrilada (NFC) y la celulosa bacteriana (BC) ha producido poco a poco mucha más relevancia como refuerzo en polímeros gracias a las superiores propiedades mecánicas que posee y la gran cristalinidad y un menor coeficiente de expansión térmica a diferencia de las fibras celulósicas que tienen tamaño micrométrico [13].

La celulosa nanofibrilada son inodoros, blancos, y como las demás nanopartículas de celulosa, también destaca por su buena resistencia, alta rigidez, y como ya se sabe son ecológicos y totalmente renovables, además tiene un aspecto que le interesa a la mayoría de industrias, es de bajo costo. Si comparamos la celulosa a escala micrométrica, estas nanofibras de celulosa se diferencian ya que tienen una superior cantidad de grupos hidroxilo funcionales en su superficie, y esto es gracias a la gran relación área superficial de volumen que ya hemos mencionado anteriormente [23]. El uso de la celulosa nanofibrilada nos ayuda a aumentar la concentración de heterociclos en diversos compuestos sintetizados, esto nos va a permitir obtener una mejor conductividad y reducir la energía de activación del proceso del proceso de transporte de protones [25]. La celulosa bacteriana (BC) es un polímero natural abundante con una red tridimensional compuesta por nanofibras, estas estructuras 3D brindan a la celulosa bacteriana excelentes propiedades mecánicas, una gran biocompatibilidad, además de poseer una buena biodegradabilidad, alta porosidad y pureza [26].

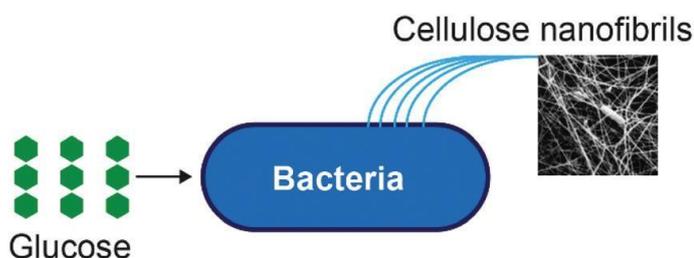
## 3. Morfología

De por sí, este nanomaterial se considera por tener al menos dimensiones en escala nanométricas. Así, según las literaturas de investigación científica, se mencionan de la existencia de hasta tres tipos de nanomateriales celulósicos:

- Nanofibras de celulosa (CNF): las cuales son producidas por técnicas únicas que permiten la fibrilación de la materia prima, que puede ser por tratamientos químicos o refinamiento mecánico. Pero presentan dificultades a la hora de generar nanocompuestos completamente degradables o biocompatibles, ya que tienden a presentar una gran tendencia de aglomeración. [9]
- Nanocristales de celulosa (CNC): presentan una estructura cristalina pura y dimensiones de 3–10 nm de ancho y una relación de aspecto (relación de mayor a menor dimensión) mayor que 5 y generalmente menor que 50. La hidrólisis ácida de enlaces glucosídicos es el método más popular para la extracción CNC. Este proceso provoca la separación de los dominios cristalinos y la degradación de los amorfos Regiones. Los parámetros

involucrados para la obtención de CNC pueden cambiar su geometría, índice de cristalinidad y relación de aspecto. [6]

- Nanocelulosa bacteriana (BNC): BNC se forma a partir de la conversión de moléculas de glucosa en nanofibrillas de celulosa por diferentes especies bacterianas, como *Acetobacter*, *Agrobacterium*, *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Azotobacter*, *Sarcina ventriculi*, *Salmonella*, *Escherichia*, *Gluconobacter*, *Komagataeibacter* (anteriormente clasificado como *Gluconacetobacter*), y *Rhizobium* (Fig. 2). [6]



**Figura 2.** Imagen esquemática de la producción de celulosa bacteriana. [6]

El comportamiento de las NPs (nanopartículas) de Celulosa como su autoensamblaje, la separación de fases y más que todo su método de síntesis, se consideran fundamentales para los resultados de sus características geométricas, como su forma y tamaño, por lo que su morfología depende tanto de la materia prima como de sus condiciones de procesamiento. Por ejemplo, en un estudio demostraron que ha mayor duración de la hidrólisis junto con un aumento en la relación ácido-pulpa generan NPs con dimensiones más cortas y longitudes más estrechas [19].

De acuerdo a las investigaciones, gracias a la microscopía de fuerza atómica, lograron detectar nanocristales de celulosa con un ancho de aproximadamente de 90 a 120 nm y una longitud variable de aproximadamente de 500 nm, mientras que en otras investigaciones se observaron nanocristales de celulosa con un ancho aproximadamente de 3-5 nm y una longitud aproximadamente de 200nm. [16]

Mediante métodos de caracterización como el SEM, se puede identificar las cualidades morfológicas de las NFC, CNC y NBC de celulosa [20]. Si bien sus formas y dimensiones siempre se presentaran de manera irregular; de las cuales los NPs pueden presentar una estructura lamelar, que son placas delgadas con diferentes espesores; sin embargo, hay situaciones en las que este material se puede presentar en individuales, aglomerados o incluso en fibras, pero dependerá de su proceso de autoensamblaje que puedan presentar según su método de síntesis [21]. Por lo que, la morfología de estas NPs es causadas por su razón de aspecto, concentración, cristalinidad he incluso en los cambios repentinos de la carga superficial [24].

Por otra parte, la morfología de la superficie y los tamaños de las NFs puede variar durante el pretratamiento químico y mecánico, por lo que en algunos estudios presentaban su superficie áspera debido a la presencia de material no celulósico [21]. Por lo cual, la celulosa presenta una estructura parcialmente cristalina y amorfa, a causa de la ubicación de la cadena glucosídica, que se mantiene unida por enlaces de H por lo que algunas estructuras permanecen intactas durante el tratamiento [22]. Ya que, es común que se presente una disminución en el grado de polimerización (DP) mientras aumenta el índice de cristalinidad (IC) a partir de la cantidad de concentración de soluciones enzimáticas presentes en la síntesis del material, además las soluciones endoglucanasas son las que mayormente influyen en el aislamiento de las nanofibras que en su despolimerización [23]. Mediante ácido hidrólisis de algodón llegaron a obtener nanofibras de celulosa con un diámetro promedio de 32.5 nm, mientras que en [12] las nanofibras de celulosa producidas a partir de OPEFB tienen un diámetro de  $27,23 \pm 8,21$  nm.

También en otro estudio se obtuvo que las NFs de celulosa extraídas de la fibra del banano, tuvieron un diámetro que variaba entre los 50nm y 100 nm y la longitud de 100 nm. [22]

Las NPs se presentan en nanovarillas con grupos de sulfatos en sus superficies, por lo tanto, su morfología es dependiente de la fuente de celulosa a usar. Por lo general se producen nanocristales con diámetro de 3 a 35 nm y longitudes entre los 0.05 y 4 micrómetros. Y de acuerdo a las condiciones de procesamiento, las NFs de celulosa se desintegran obteniendo dimensiones laterales de menores a 3 nm con presencia de fibrillas elementales; por lo general este nanomaterial obtiene diámetros de 5 a 50 nm con longitudes de unos pocos micrómetros [12].

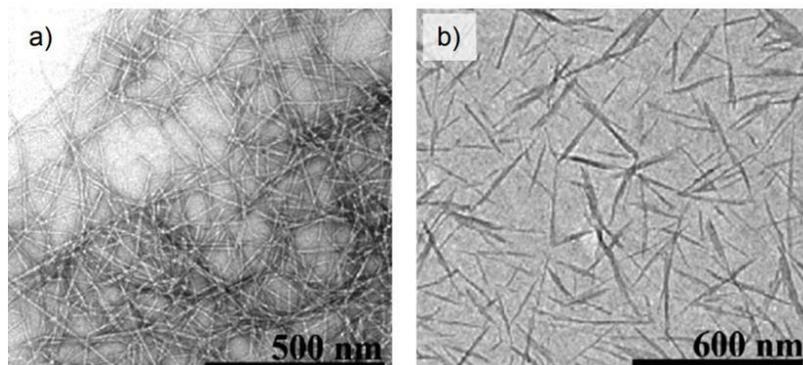


Figura 3. Micrografías electrónicas de transmisión de a) Nanofibras de celulosa y b) Nanocristales de celulosa [21].

**Tabla 1**

*Comparación lado a lado de la morfología y las propiedades físicas de BNC, CNF y CNC [5].*

Tipos de nanocelulosa	Longitud	Sección transversal	Grado de polimerización	Cristalinidad/Estructura cristalina
Nanocelulosa bacteriana	Diferentes tipos de redes de nanofibras	20 – 100 nm	4000 – 10 000	I $\alpha$ (estructura) y I $\beta$ (núcleo) – Máximo grado de cristalización
Nanofibras de celulosa	0.1 – 2um	5 – 60 nm	$\geq 500$	Principalmente I $\beta$ – Más bajo grado de cristalización
Nanocristales de celulosa	100 – 250nm (de celulosas vegetales); 100nm a varios micrómetros (de celulosas de tunicados, algas, bacterias)	5 – 70 nm	500 – 15 000	Principalmente I $\beta$ , a veces I $\alpha$ – Medio grado de cristalización

### 3. Metodología

Esta escala nano de la tecnología moderna nos permite controlar la relación del tamaño y la forma de cada partícula para adaptarlas según las propiedades que se requieran en determinados materiales y cumplir así con un objetivo. [7] Es por ello que, al mencionar los métodos de síntesis, se hace referencia a las operaciones y procedimientos de lo que se debe llevar a cabo para obtener nanomateriales de adecuada cristalinidad y pureza, de los cuales podemos identificar en las diferentes investigaciones revisadas. [8] Por lo que, a partir de procesos de síntesis podemos producir diversos compuestos químicos en escalas nanos, los cuales son sustancias o elementos difíciles de obtener de forma natural, sin embargo, hay métodos de síntesis costosos y que demandan de mucha energía. En el caso del proceso de obtención de nanopartículas poliméricas, son diversas las técnicas utilizadas, como en el caso de los polímeros sintéticos en que resaltan el método de diálisis, nanoprecipitación, emulsificación y tecnología de fluidos supercríticos [9].

Dentro de las investigaciones revisadas, los nanocristales y nanofibras son los tipos de nanomateriales a base de celulosa que mayormente resaltan por sus propiedades de uso. [10] En ciertos estudios, explicaron que los nanocristales de celulosa son sintetizados por métodos alcalinos, hidrólisis, blanqueo y explosión de vapor alcalino usando fuertes tratamientos químicos, pero su procedimiento de obtención puede ser modificado en ciertas etapas debido al tipo de material o percances presentes en la investigación. Asimismo, los métodos de síntesis utilizados para obtener nanofibras de celulosa pueden ser a partir métodos mecánicos, químicos o biológicos de fibrilación mecánica dependiendo del tratamiento, pero se necesita de bastante energía [11].

Por lo tanto, diversas investigaciones mencionan que el método convencional para la preparación de nanofibras de celulosa es el método por filtración al vacío, siendo producidas por microfibrilación de materiales macros de celulosa refina; los cuales, dicho método permite reducir el ancho de la fibra a escalas nano [10]. Además, las nanofibras también son consideradas como celulosa fibrada que son deconstruidas por fibración mecánica aplicando ya sea homogeneizadores, fundizadores, sistemas acuosos y microtrituradores [7]. De lo cual, la fibra de celulosa presenta partes amorfas de menor densidad que las zonas cristalinas, las cuales, al estar sometidas a un método de síntesis, en este caso hidrólisis ácida, esta parte amorfa se rompe y libera lo que sería las nanopartículas [12].

Asimismo, para obtener CNF (fibra de nanocelulosa) de celulosa es común usar el método de síntesis de hidrólisis ácida, en diversas investigaciones presentaron que usan ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ), lo cual permite que se degrade las regiones amorfas del material prima para dejar pasar a las zonas cristalinas. Por otra parte, las CNF de celulosa se pueden obtener mediante el método de homogeneización de alta presión, produciendo redes de entrelaces fuertes con presencia tanto de zonas amorfas como cristalinas a causa de altas fuerzas de cizallamiento [13].

Como ejemplos de síntesis de CNF tenemos mediante técnicas de desintegración, lo que nos da como resultados pequeños fragmentos, pero la dificultad es que se puede triturar las fibras, lo que sería perjudicial en el grado de polimerización y en sus propiedades [14]. Esto se debe a los fuertes enlaces de hidrógeno que presentan las cadenas moleculares de celulosa, por lo que esta energía de enlace interfibrilar debe ser superior para individualizar las fibras, además debe evitarse la coalescencia inversa

[4]. Es por ello, que las CNF de celulosa se producen en medios acuosos, lo que genera que se aflojen los enlaces de hidrógeno- interfibrilares [15].

Sin embargo, son muchos los métodos que requieren de reactivos demasiado contaminantes y costosos por lo que en los últimos años se ha buscado métodos de síntesis que no impacten

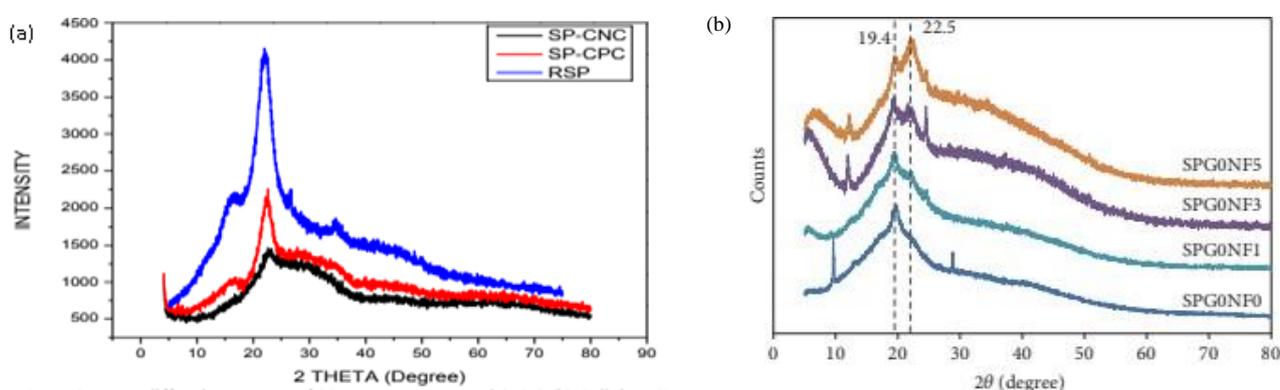
mucho en el medio ambiente como es actualmente denominado síntesis verde que busca disminuir el gasto de energía y de contaminantes, un ejemplo puede ser el uso de ultrasonido y la radiación de microondas [6].

#### 4. Resultados y discusión

Para las nanopartículas de celulosa, mayormente se utilizan imágenes de microscopía electrónica de transmisión (TEM), donde el software adicional permite registrar la longitud y el ancho de las partículas. Además, también se utilizan difractómetros de rayos X (DRX) para identificar el estado o índice de cristalinidad de las partículas. Se considera también a las características de dispersión de luz dinámica, como el diámetro promedio Z o el tamaño de partícula, la dispersión y el potencial Z [19]. Por otra parte, también se emplea microscopía electrónica de barrido de alta resolución (HRSEM) para determinar la morfología superficial del material. Asimismo, se puede aplicar espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) para evaluar la pureza y la estructura molecular del material [12].

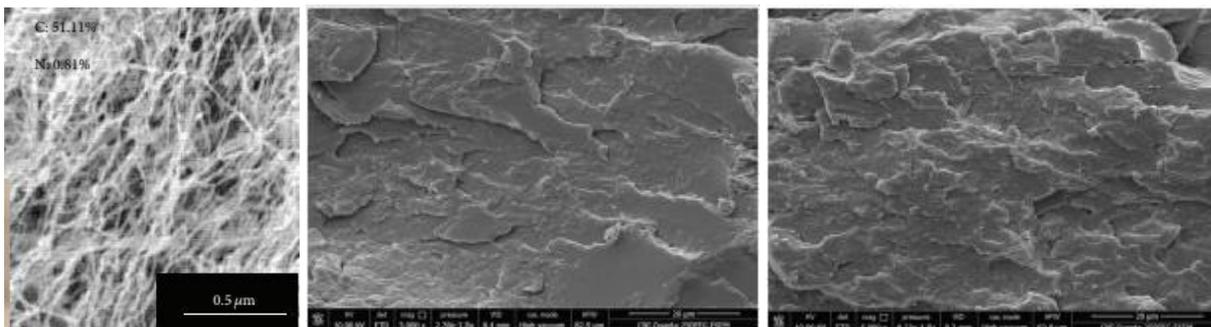
Para estos métodos de caracterización se trabaja con propiedades morfológicas y funcionales entre materias o sustancias. para ello nos otorga una información muy importante sobre su composición, estructura y propiedades. [31]

En estas nanopartículas de celulosa, se emplea imágenes de DRX donde sus descubrimientos de los resultados de hidratación hacen conveniencia a la existencia de nano materiales, donde este método permite identificar el estado o índice cristalinidad de las nanopartículas de la celulosa como se puede observar en la Fig. 4, dando como resultado nuevas fases en la microestructura [24]. Su cristalinidad final de los materiales depende de la capacidad de la cadena para formar cristales, con el contenido del glicerol su cristalinidad de las películas de almidón disminuye debido a la disminución de las interacciones intramoleculares de la cadena de almidón, mientras si aumenta la celulosa su cristalinidad de las películas aumenta también [30].



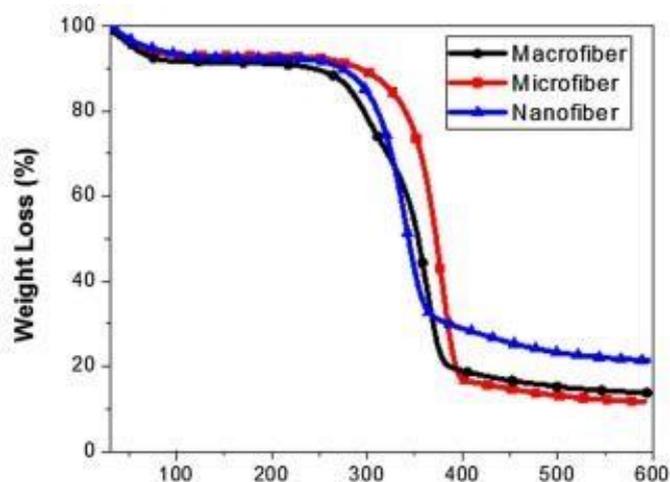
**Figura 4.** (a)Patrones de DRX de Celulosa (SPCPC) y Nanocristal de celulosa (SPCNC) [12], (b)Perfiles DRX de películas de nanocompuestos de celulosa [32].

El SEM proporciona información útil sobre la distribución de la fase de refuerzo en la matriz para esto las nanofibras de PVA y celulosa que demuestra un compuesto fracturado liso indicando una buena dispersión y homogeneidad en el compuesto aumentando su concentración de las nanofibras en una escala de micras [33], como se muestra en la Fig. 5 (b y c). Las películas producidas PUL mostraron suavidad extrema, homogeneidad sin burbujas ni poros y una superficie compacta, presentando fracturas superficiales y patrones reticulados, debiéndose a la pérdida de agua y la contracción de la capa superficial [34].



**Figura 5.** (a) Nanofibras de celulosa tratados con IL [30], PVA/compuestos de nanofibras de celulosa con (b) 2, (c) 5 % de contenido de nanofibras con un aumento de 5000x. [34]

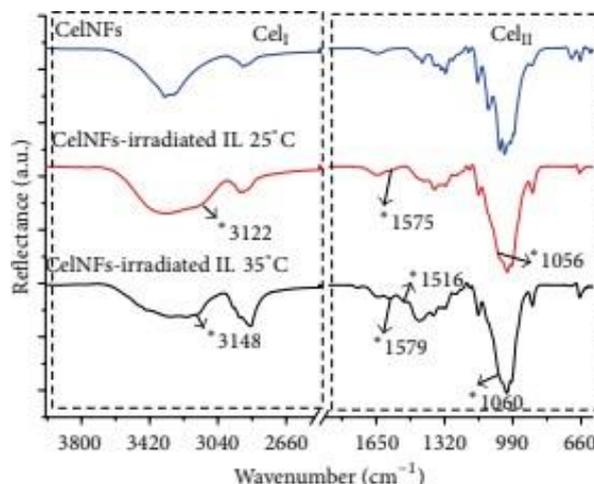
El análisis termogravimétrico (TGA) se usa para analizar las características físicas y químicas de los materiales, según la temperatura en una atmósfera controlada de forma determinada. Para este análisis [35] nos permiten investigar la degradación e identificar componentes de las microfibras blanqueadas que se desplazan a temperaturas altas en comparación con una macrofibra cruda, debido a que el blanqueo hace que las microfibras sean más resistentes a la degradación debido al mayor contenido relativo de la celulosa altamente cristalina [2]. Esta técnica facilita una indagación efectiva para la inspección de calidad, desarrollo y su investigación, empleándose como otra técnica la calorimetría diferencial de barrido (DSC) en donde determina el resultado de la temperatura en la alteración de la capacidad calorífica ( $C_p$ ) del elemento [27], tomando como patrón de una mezcla conocida determinando si se calienta o se enfría, para posteriormente ejecutar las alteraciones que se elaboran en la capacidad calorífica hasta que se cambie el flujo de calor. Permitiendo descubrir transformaciones como señales de fusión, transiciones vítreas, cambios de fase y curado [28].



**Figura 6.** Curvas TGA de macrofibras crudas, microfibras blanqueadas y nanofibras de celulosa [34].

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) facilita una dispersión de reflexión en bandas de los grupos funcionales de diversas sustancias, para su obtención de su caracterización y su verificación del material. [7] para estos trabajos analizados de la celulosa se trabajaron con varias muestras de HDPE y CELNFS donde sus espectros van a ser trabajados antes y después de la irradiación EB [10], obteniendo compuestos nano fibrosos de poliolefina, presentando regiones de absorbancia atribuidas al estiramiento. Este método permitió identificar grupos funcionales y comprender los cambios inducidos al alcanzar la nanoescala en microfibras

de fique crudas, su efectividad en la eliminación de lignina y hemicelulosa hicieron de este método un espectro similar al de la de la celulosa celular con bandas de alta intensidad [35].



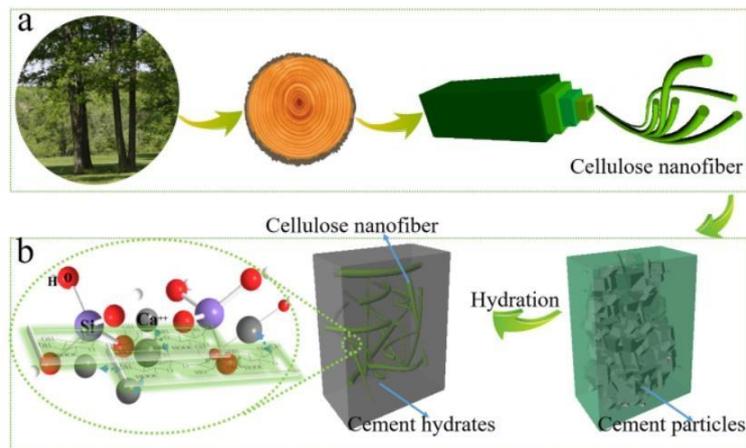
**Figura 7.** Espectros FTIR de Nanofibras de celulosa (CelNF) tratados con IL irradiados a 25°C y 35°C [30].

## 5. Conclusiones

Se ha comprobado por medio de distintas investigaciones de síntesis aplicados a las nanocelulosas, debido a la gran cristalinidad de la nanofibrilada y la celulosa bacteriana han sido últimamente requerido como refuerzo renovable para que se pueda elaborar biocompuesto con un elevado rendimiento [5]. Se comprobó que, la celulosa bacteriana (BC) ha tenido un gran realce, porque se ha utilizado de gran manera en el ámbito de la electrónica flexible, dispositivos biomédicos, cosméticos, ingeniería de tejidos, liberación de fármacos, debido a su excelente seguridad y confiabilidad. También por las buenas propiedades conductivas que posee, al ser aplicados rellenos conductivos (CNT y PP), esto ayudaría a incrementar aun las incompueto fibras de BC conductivo, con el fin de innovar con la tecnología ecológicas y biodegradable, a fin de recolectar energía portátil [18].

Además, en los últimos años la ciencia ha tenido un mayor interés en el desarrollo de materiales biodegradables, y la celulosa no es ajeno a ello, por esto se logró comprobar que la incorporación de las nanofibras de celulosa (CNF) a películas de almidón, y estas pueden mejorar considerablemente sus propiedades mecánicas, físicas y térmicas, debido a la alta cristalinidad de la celulosa. Según Vanessa y otros (2020) demostraron que el uso de la nanofibra de celulosa representa un camino muy atrayente para producir materiales a base de almidón que sean más resistentes, por ello se sugiere incrementar su utilización como materiales de empaque y en películas biodegradables [29].

Por lo que podemos deducir que, el uso de las nanofibras de celulosa está teniendo una gran importancia en el ámbito de la construcción, ya que en recientes estudios se ha comprobado que al agregar nanofibras de celulosa a las pasta de cemento, esta hará que su resistencia mecánica mejore de una manera mucho más efectiva con una baja fracción de nanofibras, además también es importante mencionar que los grupos hidroxilo y barboxilo de celulosa forman enlaces de hidrógeno con los hidratos del cemento, por ellos la microestructura de las pastas de cemento mejorar de manera considerable, entonces gracias a las nanofibras de celulosa se podrá tener una construcción con una mejor resistencias y gran durabilidad [28].



**Figura 8.** Esquema de la interacción entre las nanofibras de celulosa y partículas de cemento. (a) Jerarquía para la obtención de celulosa. (b) Nanofibras de celulosa con la pasta de cemento formado con grupos carbozilo e hidratos de cemento. [28]

## 6. Referencias bibliográficas

- [1] Jasmani, L., Jamaluddin, N. A. N., Rusli, R., Adnan, S., & Zakaria, S. (2022). Different Preparation Method of Nanocellulose from *Macaranga gigantea* and Its Preliminary Study on Packaging Film Potential. *Polymers*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/polym14214591>.
- [2] Fahma, F., Febiyanti, I., Lisdayana, N., Arnata, I. W., & Sartika, D. (2021). Nanocellulose as a new sustainable material for various applications: A review. In *Archives of Materials Science and Engineering* (Vol. 109, Issue 2, pp. 49–64). International OCSCO World Press. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2624>
- [3] Sabo, R. C., Elhajjar, R. F., Clemons, C. M., & Pillai, K. M. (2015). Characterization and processing of nanocellulose thermosetting composites. In *Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application: Volume C: Polymer Nanocomposites of Cellulose Nanoparticles* (pp. 265–296). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-45232-1\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45232-1_64)
- [4] Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., Hamidon, T. S., Masruchin, N., Brosse, N., & Hussin, M. H. (2020). Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00392>
- [5] Klemm, D., Cranston, E. D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S. A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T., Nietzsche, S., Petzold-Welcke, K., & Rauchfuß, F. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. In *Materials Today* (Vol. 21, Issue 7, pp. 720–748). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.02.001>
- [6] Nascimento, D. M., Nunes, Y. L., Figueirêdo, M. C. B., de Azeredo, H. M. C., Aouada, F. A., Feitosa, J. P. A., Rosa, M. F., & Dufresne, A. (2018). Nanocellulose nanocomposite hydrogels: Technological and environmental issues. In *Green Chemistry* (Vol. 20, Issue 11, pp. 2428–2448). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8gc00205c>
- [7] K. Aimonen, M. Imani, M. Hartikainen, S. Suhonen, E. Vanhala, C. Moreno, O. J. Rojas, H. Norppa y J. Catalán, «Surface functionalization and size modulate the formation of reactive oxygen species and genotoxic effects of cellulose nanofibrils.» *Particle and Fibre Technology*, p. 21, 2022.
- [8] J. Carvalho, A. Silva, A. Silvestre, C. Freire y C. Vilela, «Spherical Cellulose Micro and Nanoparticles: Recent Developments and Applications,» *Nanomaterials*, p. 35, 2021.
- [9] P. Kumari, G. Pathak, R. Gupta y A. Meena, «Cellulose nanofibers from lignocellulosic biomass of lemongrass using enzymatic hydrolysis: characterization and cytotoxicity assessment.» *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, p. 11, 2019.
- [10] M. Nasir, M. Arif Aziz, M. Zubair, N. Ashraf, T. Nasreldin Hussein, M. Khalid Allubli, M. Saood Manzar, W. Al-Kutti y M. A. Al-Harhi, «Engineered cellulose nanocrystals-based

cement mortar from office paper waste: Flow, strength, microstructure, and thermal properties,» ELSEVIER, vol. 51, 2022.

- [11] M. T. P. a. K. Kanny, «Study of Curing Characteristics of Cellulose Nanofiber-Filled Epoxy Nanocomposites,» Study of Curing Characteristics of Cellulose Nanofiber-Filled Epoxy Nanocomposites, 2020.
- [12] V. A. b. Chioma, B. W. Akan , I. I. Adedayo, T. Chionyedua, O. Cyril y L. Petrik, «Preparation and Characterisation of Cellulose Nanocrystal from Sugarcane Peels by XRD, SEM and CP/MAS 13C NMR,» Journal of Physics, p. 9, 2019.
- [13] K. Yuwawech, J. Wootthikanokkhan y S. Tanpichai, «Effects of Two Different Cellulose Nanofiber Types on Properties of Poly(vinyl alcohol) Composite Films,» Hindawi Publishing Corporation, pp. 2-10, 2015.
- [14] K. Aimonen, M. Imani, M. Hartikainen, S. Suhonen, E. Vanhala, C. Moreno, O. J. Rojas, H. Norppa y J. Catalán, «Surface functionalization and size modulate the formation of reactive oxygen species and genotoxic effects of cellulose nanofibrils.,» Particle and Fibre Technology, p. 21, 2022.
- [15] R. Gao, Y. Shang, P. Jiao, Y. Jiao, J. Li y Y. Lu, «Polydopamine Induced Wettability Switching of Cellulose Nanofibers/n-Dodecanethiol Composite Aerogels,» Hindawi, p. 9, 2022.
- [16] J. Carvalho, A. Silva, A. Silvestre, C. Freire y C. Vilela, «Spherical Cellulose Micro and Nanoparticles: Recent Developments and Applications,» Nanomaterials, p. 35, 2021.
- [17] N. S. Alsaiani, K. Shanmugam, H. Mothilal, D. Ali y S. V. Prabhu, «Optimization of Spraying Process via Response Surface Method for Fabrication of Cellulose Nanofiber (CNF) Film,» Journal of Nanomaterials, p. 10, 2022.
- [18] K.-M. Chin, S. T. Sam, H. L. Ong, Y. S. Wong, W. K. Tan y V. Vannaladsaysy, «Bioinspired Crosslinked Nanocomposites of Polyvinyl Alcohol-Reinforced Cellulose Nanocrystals Extracted from Rice Straw with Ethanedioic Acid,» Journal of Nanomaterials, p. 16, 2022.
- [19] F. Fahma, N. Hori, T. Iwata y A. Takemura, «PVA nanocomposites reinforced with cellulose nanofibers from oil palm empty fruit bunches (OPEFBs).,» 2017. [En línea]. Available: <https://link.gale.com/apps/doc/A607349655/AONE?u=univcv&sid=bookmark-AONE&xid=4f232637>.
- [20] F. E. Fleury, M. A. Ponton, A. P. Duarte, P. Cassagnau, A. Magnin, A. Almeida, A. M. Botelho do Rego, F. Pignon y M. N. Belgacem, «Cellulose Nanofibers for the Production of Bionanocomposites,» 2015. [En línea]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01244186/document>.
- [21] A. N. Frone, D. M. Panaitescu, I. Chiulan, C. A. Nocilae, Z. Vuluga y C. Vitelaru, «The effect of cellulose nanofibers on the crystallinity and nanostructure of poly(lactic acid) composites,» 2016. [En línea]. Available: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&u=univcv&id=GALE|A470485299&v=2.1&it=r&sid=bookmark-%20AONE&asid=c66190d0>
- [22] S. Hu, Z. Shi, K. Chen, N. Xu y Y. Wang, «Biodegradable, Super-Strong, and Conductive Cellulose Macrofibers for Fabric-Based Triboelectric Nanogenerator,» 2022. [En línea]. Available: <https://link.gale.com/apps/doc/A702000556/AONE?u=univcv&sid=bookmark-AONE&xid=72a2b20c>.
- [23] M. El-Feky, A. El-Tair, M. Kohail y M. Serag, «Nano-Fibrillated Cellulose as a Green Alternative to Carbon Nanotubes in Nano Reinforced Cement Composites,» International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, vol. 8, n° 12, pp. 484-491, 2019.
- [24] J. Flores, M. Kamali y A. Ghahremaninezhad, «An Investigation into the Properties and Microstructure of Cement Mixtures Modified with Cellulose Nanocrystal,» Materials, vol. 10, n° 498, pp. 2-16, 2017.
- [25] I. A. Jankowska, K. Pogorzelec-Glaser, P. Ławniczak, M. Matczak y R. Pankiewicz, «New liquid-free proton conductive nanocomposite based on imidazole- functionalized cellulose nanofibers,» Cellulose, 2020.
- [26] S. Hu, J. Han, Z. Shi, K. Chen, N. Xu, Y. Wang, R. Zheng, Y. Tao, Q. Sun, Z. L. Wang y G. Yang, «Biodegradable, Super-Strong, and Conductive Cellulose Macrofibers for Fabric-Based Triboelectric Nanogenerator,» Nano-Micro Letters, vol. 14, n° 115, pp. 2-20, 2020.
- [27] K. Gurshaga, A. Djioleu, K. Rajan, N. Labbé, J. Sakon, D. J. Carrier y J.-W. Kim, «Maximizing production of cellulose nanocrystals and nanofibers from pre- extracted loblolly pine kraft pulp: a response surface approach,» Kandhola et al. Bioresour. Bioprocess, p. 16, 2020.

- [28] B. Fan, Q. Yao, C. Wang, Y. Xiong, Q. Sun y C. Jin, «Spawns Structure of Rod-Like ZnO Wrapped in Cellulose Nanofibers for Electromagnetic Wave Absorption,» 2017. [En línea]. Available: <https://link.gale.com/apps/doc/A546286909/AONE?u=univcv&sid=bookmark-AONE&xid=dab49764>.
- [29] C. Saurabh, A. Mustapha, M. M. Masri, A. F. Owolabi, M. I. Syakir, R. Dungani, M. T. Paridah, M. Jawaid y H. P. S. Abdul Khalil, «Isolation and Characterization of Cellulose Nanofibers from Gigantochloa scortechinii as a Reinforcement Material,» [En línea].
- [30] C. Croitoru y S. Patachia, «Long-Chain Alkylimidazolium Ionic Liquid Functionalization of Cellulose Nanofibers and Their Embedding in HDPE Matrix,» Hindawi, p. 9, 2016.
- [31] D. Rahmat y C. Devina, «Synthesis and Characterization of a Cationic Thiomer Based on Ethyl Cellulose for Realization of Mucoadhesive Tablets and Nanoparticles,» International Journal of Nanomedicine, vol. 17, pp. 2321-2333, 2022.
- [32] F. Fahma, Sugiarto, T. C. Sunarti, S. M. Indriyani y N. Lisdayana, «Thermoplastic Cassava Starch-PVA Composite Films with Cellulose Nanofibers from Oil Palm Empty Fruit Bunches as Reinforcement Agent,» Hindawi.
- [33] A. R. Kakroodi, S. Cheng, M. Sain y A. Asiri, «Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Nanocomposites Based on Polyvinyl Alcohol and Cellulose Nanofiber from Aloe vera Rind,» p. 7, 2014.
- [34] M. Thangavelu y S. V. Kulandhaivelu, «Development and Characterization of Pullulan-Carboxymethyl Cellulose Blend Film for Packaging Applications,» Hindawi, p. 10, 2022.
- [35] S. F. Souza, A. L. Leao, C. B. Lombello, M. Sain y M. Ferreira, «Cytotoxicity studies of membranes made with cellulose nanofibers from fique macrofibers,» J Mater Sci, vol. 52, pp. 2581-2590, 2017.
- [36] L. Jiao, M. Su, L. Chen, Y. Wan, H. Zhu y H. Dai, «Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement,» PLOS | ONE, vol. 11, n° 12, pp. 1-13, 2016.
- [37] V. Soltes de Almeida, B. R. Válio Barretia, V. C. Ito, L. Malucelli, M. A. d. S. Carvalho Filho, I. Mottin Demiate, L. A. Pinheiro y L. G. Lacerda, «Thermal, Morphological, and Mechanical Properties of Regular and Waxy Maize Starch Films Reinforced with Cellulose Nanofibers (CNF),» Materiales Research, vol. 23, n° 2, 2020.
- [38] G. Yang, Z. Zhang, K. Liu, X. Ji, P. Fatehi y J. Chen, «A cellulose nanofibril-reinforced hydrogel with robust mechanical, self-healing, pH-responsive and antibacterial characteristics for wound dressing applications,» Journal of Nanobiotechnology, vol. 30, n° 312, pp. 2-16, 2022.