Valorización de fibras celulósicas provenientes de papel impreso con potencial aplicación en membranas biomédicas

Valorization of cellulosic fibers derived from printed paper with potential application in biomedical membranes

Emilio Pérez Pacheco [1]
Alejandro Ortiz Fernández [2]
Mario Adrián de Atocha Dzul Cervantes[3*]

RESUMEN

La recuperación de fibras celulósicas provenientes de papel impreso representa una alternativa para la valorización de residuos y su aprovechamiento en materiales de mayor valor agregado. El presente trabajo tuvo como objetivo analizar comparativamente las tecnologías de destintado y purificación empleadas para recuperar fibras celulósicas a partir de residuos de papel, considerando las condiciones de procesamiento, las propiedades fisicoquímicas, las limitaciones y el potencial de aplicación en membranas biomédicas. Se realizó una revisión bibliográfica analítico-comparativa de investigaciones publicadas entre 2020 y 2026 relacionadas con tratamientos físicos, químicos y enzimáticos, así como con técnicas de caracterización de fibras recuperadas. Los resultados muestran que el tipo de tratamiento puede favorecer las propiedades de las fibras celulósicas recuperadas. Asimismo, las técnicas FTIR y TGA complementan la evaluación de las características químicas y térmicas de las fibras, aunque por sí solas no demuestran la eliminación completa de los contaminantes. La información analizada indica que no existe un tratamiento único aplicable a todas las fibras secundarias, por lo que su selección debe considerar la materia prima y la aplicación final. El aprovechamiento de la celulosa recuperada en membranas biomédicas resulta prometedor, pero requiere evaluaciones posteriores de la pureza, las propiedades funcionales y la seguridad biológica.

PALABRAS CLAVES: recuperación de fibras; purificación celulósica; valorización de residuos; caracterización fisicoquímica; membranas celulósicas.

Fecha de recepción: 11 de septiembre, 2026.

Fecha de aceptación: 23 de octubre, 2026.

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Calkiní. Cuerpo Académico Bioprocesos. Av. Ah Canul SN por Carretera Federal, C.P. 24900, Calkiní, Campeche, México. https://orcid.org/0000-0003-2242-1183, eperez@itescam.edu.mx
[2]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Calkiní. Cuerpo Académico Bioprocesos. Av. Ah Canul SN por Carretera Federal, C.P. 24900, Calkiní, Campeche, México. https://orcid.org/0000-0002-9689-2124, aeortiz@itescam.edu.mx
[3]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Calkiní. Cuerpo Académico Bioprocesos. Av. Ah Canul SN por Carretera Federal, C.P. 24900, Calkiní, Campeche, México. https://orcid.org/0000-0002-9095-7281. Autor para correspondencia: maadzul@itescam.edu.mx

CC BY NC ND

ABSTRACT

Recovering cellulosic fibers from printed paper offers an alternative for waste valorization and their use in higher-value materials. This study aimed to compare deinking and purification technologies used to recover cellulosic fibers from paper waste, considering processing conditions, physicochemical properties, limitations, and potential applications in biomedical membranes. This analytical-comparative literature review covered research published between 2020 and 2026 on physical, chemical, and enzymatic treatments, as well as techniques for characterizing recovered fibers. The results indicate that the type of treatment can enhance the properties of the recovered cellulosic fibers. Furthermore, FTIR and TGA techniques complement the assessment of the chemical and thermal characteristics of the fibers, although they do not, on their own, demonstrate the complete removal of contaminants. The results suggest that no single treatment applies to all secondary fibers; therefore, the choice of method must consider the raw material and the intended final application. Using recovered cellulose in biomedical membranes is promising, but it requires further evaluation of purity, functional properties, and biological safety.

KEYWORDS: fiber recovery; cellulosic purification; waste valorization; physicochemical characterization; cellulosic membranes.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la generación de residuos ha impulsado el aprovechamiento de materiales secundarios como materias primas para elaborar productos de mayor valor agregado. Entre ellos, el papel residual constituye una fuente importante de fibras celulósicas que pueden recuperarse mediante tratamientos físicos y químicos. Sin embargo, la presencia de tinta, cargas minerales, agentes de encolado y otros aditivos puede modificar las propiedades de las fibras y limitar su aprovechamiento posterior. En este sentido, la recuperación y purificación de fibras secundarias depende tanto de la composición de la materia prima como de las condiciones de procesamiento utilizadas [1, 2].

El destintado es una etapa fundamental para separar las partículas de tinta adheridas a las fibras. Los procedimientos convencionales comprenden operaciones de desintegración, tratamientos químicos, flotación y lavado; no obstante, se han desarrollado alternativas enzimáticas y físicas para mejorar la eficiencia del proceso. Se ha reportado que el uso de combinaciones enzimáticas puede favorecer las propiedades ópticas y mecánicas de las pulpas recuperadas [3], mientras que el pretratamiento mediante ultrasonido, solo o combinado con enzimas, puede facilitar el desprendimiento de la tinta mediante fenómenos asociados a la cavitación [4].

Después del destintado, pueden aplicarse tratamientos adicionales de purificación para reducir los componentes residuales. Entre ellos se encuentran los tratamientos alcalinos y las secuencias libres de cloro elemental (Elemental Chlorine Free, ECF), que emplean agentes oxidantes y etapas de extracción alcalina. Sin embargo, las condiciones de estos procesos deben controlarse, ya que pueden modificar la estructura molecular de la celulosa [5]. Por ello, la evaluación de las fibras recuperadas requiere considerar tanto la eliminación de contaminantes como la conservación de sus propiedades químicas y térmicas.

El aprovechamiento de la celulosa recuperada también ha despertado interés en la fabricación de películas y membranas. Se han obtenido membranas de nanocelulosa a partir de diferentes residuos de papel, y se ha observado que tanto la materia prima como las condiciones de procesamiento

CC BY NC ND

influyen en su estructura y propiedades [6, 7]. En el área biomédica, la celulosa y sus derivados presentan potencial para desarrollar materiales funcionales; sin embargo, cuando proceden de residuos impresos, debe considerarse la posible presencia de contaminantes y la necesidad de evaluar su bioseguridad antes de determinar su viabilidad para el contacto con sistemas biológicos [8, 9].

En este sentido, las tecnologías de destintado y purificación constituyen etapas determinantes en la valorización de fibras procedentes de papel impreso. No obstante, las diferencias entre las materias primas, los tratamientos y los métodos de caracterización dificultan el establecimiento de criterios generales de selección. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue analizar comparativamente las tecnologías de destintado y purificación utilizadas para valorizar fibras celulósicas provenientes de papel impreso, mediante la revisión de sus condiciones de procesamiento, características fisicoquímicas y principales limitaciones, a fin de establecer su potencial de aprovechamiento en el desarrollo de membranas destinadas al ámbito biomédico [1].

JUSTIFICACIÓN

La recuperación de fibras celulósicas procedentes de papel impreso constituye una alternativa para valorizar los residuos y ampliar sus posibilidades de aprovechamiento. Sin embargo, la presencia de tinta, cargas minerales y otros componentes incorporados durante la fabricación e impresión puede limitar las propiedades de las fibras recuperadas. En consecuencia, resulta necesario analizar las tecnologías de destintado y purificación disponibles, considerando sus condiciones de procesamiento, sus mecanismos de separación y sus efectos sobre la composición y las propiedades de la celulosa.

Asimismo, la evaluación de los parámetros de composición y el uso de técnicas como FTIR y TGA proporcionan información sobre las características químicas y térmicas de las fibras tras su recuperación. Este análisis adquiere mayor importancia cuando se plantea su posible transformación en membranas destinadas al ámbito biomédico, ya que el uso de celulosa proveniente de papel impreso requiere considerar tanto sus propiedades fisicoquímicas como la posible presencia de componentes residuales. Por ello, la comparación de las tecnologías disponibles permitirá identificar sus ventajas, limitaciones y criterios de selección, así como establecer las evaluaciones complementarias necesarias para orientar futuras investigaciones sobre materiales celulósicos con potencial de aplicación biomédica.

METODOLOGÍA

La presente investigación fue desarrollada mediante una revisión bibliográfica de carácter descriptivo y analítico-comparativo, y está orientada al estudio de procesos de destintado y purificación para recuperar fibras celulósicas procedentes de papel impreso, así como a la caracterización de sus propiedades fisicoquímicas y a su posible aprovechamiento para el desarrollo de membranas biomédicas. La investigación se fundamentó en el análisis de la información científica publicada, considerando los procesos de recuperación, las condiciones de procesamiento y los métodos de caracterización empleados para determinar las propiedades de los materiales obtenidos.

Para la recopilación de información, se analizaron artículos científicos publicados entre 2020 y 2026, disponibles en revistas de alto impacto enfocadas en ingeniería de materiales, tecnología de la pulpa y el papel, polímeros y biomateriales. La búsqueda bibliográfica se orientó hacia publicaciones disponibles en plataformas editoriales de alto impacto internacional, utilizando combinaciones de palabras clave en inglés y español, entre ellas waste paper, printed paper, cellulose recovery, deinking, ultrasound-assisted deinking, cellulose purification, bleaching, cellulose membranes y

CC BY NC ND

biomedical applications. Se priorizaron investigaciones que describieran procedimientos experimentales para la recuperación y purificación de fibras secundarias, así como estudios relacionados con el procesamiento y la caracterización de materiales poliméricos.

La selección de los documentos se estableció considerando su relación con los procesos de destintado y purificación, la descripción de las condiciones experimentales y la disponibilidad de resultados que permitieran identificar modificaciones en las propiedades de las fibras de celulosa. Se consideraron investigaciones que utilizaran tratamientos físicos, químicos y enzimáticos, como ultrasonido, flotación, lavado y secuencias de blanqueo. Asimismo, se incorporaron estudios sobre el procesamiento y la caracterización de membranas celulósicas, con el fin de identificar posibles aplicaciones biomédicas para el aprovechamiento de las fibras recuperadas. Para la comparación de los procesos, se distinguieron las investigaciones realizadas con papel impreso de aquellas que utilizaron fibras secundarias, debido a las diferencias en la composición y las características de las materias primas.

Posteriormente, la información se organizó en función de los autores, el año de publicación, el tipo de materia prima, la tecnología utilizada, las condiciones de procesamiento y de caracterización, así como de los principales resultados reportados. Para evaluar las modificaciones asociadas a los tratamientos de destintado y purificación, se analizaron los contenidos de α-, β- y γ-celulosa, el número Kappa y las cenizas, siempre que estuvieran disponibles. De manera complementaria, se consideraron los resultados fisicoquímicos obtenidos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) y análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés), con el fin de identificar cambios en las características químicas y en el comportamiento térmico de las fibras recuperadas.

El análisis se realizó mediante la comparación de las condiciones experimentales y de los resultados de las investigaciones. Los datos reportados se organizaron en tablas para facilitar la identificación de diferencias y tendencias entre los tratamientos. Cuando las condiciones experimentales o los procedimientos de caracterización no fueron equivalentes, los resultados se examinaron de forma individual, evitando establecer comparaciones directas entre parámetros determinados bajo condiciones distintas. Asimismo, con la finalidad de identificar los factores que pueden influir en la calidad de las fibras celulósicas recuperadas, se consideraron las limitaciones de los procesos y de las técnicas de caracterización empleadas.

Finalmente, la información se integró mediante un análisis comparativo de las tecnologías de desintoxicación y purificación, de las modificaciones en la composición y las propiedades fisicoquímicas de las fibras, y de sus perspectivas de aprovechamiento para el desarrollo de membranas biomédicas. Para esta última evaluación se consideraron las características generales requeridas para materiales celulósicos destinados a aplicaciones biomédicas, diferenciando las propiedades demostradas experimentalmente de aquellas que requieren estudios complementarios de pureza, biocompatibilidad y desempeño funcional. Este análisis permitió establecer algunos factores para la valorización de alternativas de recuperación de fibras provenientes de residuos de papel e identificar las principales limitaciones y oportunidades para su aprovechamiento en materiales de mayor valor agregado.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis comparativo de las tecnologías de destintado y purificación de fibras celulósicas

CC BY NC ND

La recuperación de fibras celulósicas a partir de residuos de papel se ha estudiado mediante diferentes procesos físicos, químicos y enzimáticos, cuya eficacia depende de las características de la materia prima, del tipo de impresión y de las condiciones de procesamiento. La revisión de las investigaciones permitió identificar que las tecnologías utilizadas presentan diferencias en sus mecanismos de acción y en las propiedades que buscan mejorar. Mientras que algunos tratamientos se orientan principalmente a la separación de partículas de tinta, otros se enfocan en la remoción de cargas minerales, la eliminación de componentes residuales y la conservación de las características estructurales de las fibras. Estas diferencias resultan importantes para establecer criterios de selección de los procedimientos de recuperación, particularmente cuando se pretende aprovechar la celulosa en aplicaciones distintas de la fabricación convencional de papel.

Entre las alternativas estudiadas, el destintado enzimático ha mostrado resultados favorables en la recuperación de fibras secundarias. En una investigación [3], los autores utilizaron una combinación de enzimas fúngicas, incluyendo celulasas, amilasas, xilanasas, pectinasas, lipasas y enzimas ligninolíticas, para el tratamiento de papel de oficina, periódico y papel escrito con bolígrafo. Los resultados mostraron valores de brillo ISO de 84.91 %, 72.51 % y 76.69 %, respectivamente, mientras que los índices de destintado fueron de 82.89 %, 68.95 % y 76.49 %. Asimismo, se reportaron mejoras en las propiedades mecánicas de las pulpas recuperadas y la posibilidad de aprovechar los efluentes del tratamiento en procesos posteriores para la producción de biobutanol. Estos resultados indicarían que los tratamientos enzimáticos pueden contribuir tanto a la recuperación de fibras como al aprovechamiento de los residuos generados durante su procesamiento.

Por otra parte, el ultrasonido constituye una alternativa de pretratamiento que puede favorecer el desprendimiento de partículas de tinta mediante los fenómenos de cavitación generados en el medio líquido. Autores [4] evaluaron la combinación de ultrasonido y celulasas bacterianas para el destintado de papel residual, reportando la remoción de 2310 ppm de tinta mediante un tratamiento ultrasónico de 15 minutos y una concentración de enzima de 2 %. Los investigadores observaron modificaciones en la morfología superficial de las fibras, así como cambios en sus características estructurales. Estos resultados sugieren que la combinación de tratamientos físicos y enzimáticos puede favorecer la separación de contaminantes; sin embargo, su efectividad depende de las condiciones de aplicación y de la respuesta del material tratado.

En cuanto a los tratamientos químicos, se han desarrollado procedimientos para eliminar los componentes que persisten en las fibras después de la aplicación de los métodos convencionales de separación. En este sentido, investigadores [2] evaluaron la extracción de cargas minerales presentes en residuos de papel mediante una solución de ácido acético a 0.2 M, obteniendo una eficiencia de extracción del carbonato de calcio precipitado del 86 %. Adicionalmente, reportaron una disminución del 93 % en las concentraciones de disolventes clasificados como peligrosos después del tratamiento. Estos resultados evidenciarían que la remoción de partículas de tinta no implica necesariamente la eliminación de todos los componentes residuales del papel y que pueden requerirse tratamientos complementarios, según las características finales deseadas de las fibras.

De manera complementaria, se ha estudiado la clasificación física de las fibras como etapa previa a los tratamientos químicos de purificación. Autores [1] evaluaron la recuperación de celulosa a partir de residuos de cartón corrugado mediante la separación mecánica, la clasificación de fibras y tratamientos químicos posteriores. Los resultados mostraron que la fracción de finos separada durante la clasificación presentó concentraciones elevadas de componentes no celulósicos, entre ellos 12.4 % de cenizas. La separación de estas fracciones permitió obtener materiales con una composición más homogénea para los tratamientos posteriores. Aunque esta investigación utilizó

CC BY NC ND

cartón corrugado y no papel de impresión, aporta información sobre la importancia de considerar la heterogeneidad de la materia prima en la recuperación de fibras secundarias.

La Tabla 1 presenta una comparación de las principales tecnologías identificadas en las investigaciones seleccionadas, considerando el tipo de materia prima, los tratamientos aplicados y los resultados reportados.

Tabla 1. Análisis comparativo de tecnologías empleadas para la recuperación y purificación de fibras celulósicas procedentes de residuos de papel.

Investigación	Materia prima	Tratamiento	Principales resultados
Reynolds et al. [1]	Cartón corrugado recuperado	Clasificación mecánica, extracción química y blanqueo	Separación de una fracción de finos con 12.4 % de cenizas y obtención de pulpas de mayor pureza
Kucbel et al. [2]	Papel de oficina y otros residuos papeleros	Extracción con ácido acético y lavado	86 % de extracción de carbonato de calcio precipitado y disminución de 93 % de disolventes peligrosos
Mondal et al. [3]	Papel de oficina, periódico y papel escrito	Tratamiento mediante combinación de enzimas fúngicas	Mejora de las propiedades ópticas y mecánicas y aprovechamiento de efluentes
Gea et al. [4]	Papel residual	Ultrasonido y celulasas bacterianas	Remoción de 2310 ppm de tinta con 15 min de ultrasonido y 2 % de enzima
Goto et al. [5]	Pulpas celulósicas	Quelación y blanqueo con peróxido	Evaluación de la remoción de metales y del daño oxidativo de la celulosa

***Nota.** La información se basa en estudios experimentales realizados con distintas materias primas y bajo diferentes condiciones de procesamiento. El estudio de Goto et al. [5] se centra en el blanqueo y la protección de la celulosa, no en un ensayo de destintado.

La comparación presentada permite observar que no existe un procedimiento único adecuado para todas las fuentes de fibras secundarias, y que esto dependería de la aplicación a la que estén destinadas. Los tratamientos enzimáticos y ultrasónicos se orientan principalmente a favorecer la separación de la tinta, mientras que los procedimientos de extracción química pueden contribuir a la remoción de cargas minerales y otros componentes residuales. Por otra parte, la clasificación mecánica permite separar fracciones con características distintas antes de aplicar tratamientos posteriores. De esta manera, la elección de la tecnología debe considerar las características de la materia prima y los parámetros de calidad necesarios para aprovecharla.

Influencia de los tratamientos sobre la composición de las fibras recuperadas

La composición química de las fibras secundarias es uno de los principales parámetros para evaluar los cambios producidos durante los procesos de destintado y purificación. Las fibras provenientes de papel reciclado pueden contener diferentes proporciones de celulosa, hemicelulosa, lignina residual y componentes inorgánicos, cuya presencia depende tanto del origen de la materia prima como de los tratamientos aplicados durante su fabricación y recuperación. En este sentido, la evaluación de la composición permite determinar las modificaciones producidas por los procedimientos de separación y establecer relaciones entre las características de los materiales recuperados y sus posibilidades de aprovechamiento.

CC BY NC ND

En otra investigación [1], se evaluó la clasificación de fibras procedentes de cartón corrugado recuperado y su posterior purificación mediante tratamientos químicos. Los autores reportaron que aproximadamente el 22 % del material separado durante la clasificación correspondió a la fracción de finos, la cual presentó contenidos de lignina, hemicelulosa y cenizas de 22.1 %, 14.5 % y 12.4 %, respectivamente. Por otra parte, el contenido de cenizas de las fracciones fibrosas clasificadas fue inferior al 3.2 %, frente al 6.5 % del material inicial. Estos resultados muestran que la separación de fracciones con mayor contenido de componentes no celulósicos puede modificar la composición del material recuperado antes de aplicar tratamientos químicos posteriores.

De manera similar, se ha reportado que la remoción de cargas minerales constituye una etapa importante en la recuperación de celulosa a partir de residuos de papel. Autores [2] evaluaron el tratamiento con ácido acético para eliminar el carbonato de calcio precipitado y otros componentes presentes en las fibras secundarias. Los investigadores identificaron 138 compuestos químicos en las muestras de residuos de papel, incluidas sustancias relacionadas con las materias primas, los aditivos de fabricación y las tintas de impresión. La disminución de los componentes minerales y de determinados contaminantes orgánicos después del tratamiento evidenció que la purificación de las fibras requiere considerar diferentes grupos de sustancias, y no únicamente las partículas de tinta visibles.

Por otra parte, la evaluación del coeficiente Kappa se ha utilizado como indicador complementario para caracterizar pulpas sometidas a diferentes tratamientos. En el estudio realizado por los autores de [3], las pulpas obtenidas mediante destintado enzimático presentaron valores de número Kappa de 12.9, 13.6 y 13.1 para papel de oficina, periódico y papel escrito con bolígrafo, respectivamente. Estos resultados permiten observar diferencias entre las materias primas tratadas; sin embargo, dado que el número Kappa se relaciona con el consumo de un agente oxidante, su interpretación debe considerar la presencia de otros componentes oxidables, además de la lignina residual. Por ello, su uso como indicador de purificación debe complementarse con otras determinaciones de composición.

La Tabla 2 presenta los principales resultados de composición reportados en las investigaciones seleccionadas y su contribución a la evaluación de los tratamientos de recuperación.

Tabla 2. Parámetros de composición utilizados para caracterizar fibras celulósicas recuperadas de residuos de papel.

Parámetro	Resultados reportados	Interpretación
Lignina y hemicelulosa [1]	22.1 % y 14.5 % en la fracción de finos separada	Identificación de fracciones con mayor proporción de componentes no celulósicos
Cenizas [1]	6.5 % en el material inicial y menos de 3.2 % en las fracciones fibrosas clasificadas	Reducción del contenido inorgánico mediante clasificación
Carbonato de calcio [2]	86 % de eficiencia de extracción mediante ácido acético	Remoción de cargas minerales presentes en el papel
Número Kappa [3]	12.9, 13.6 y 13.1 para tres tipos de papel destintado	Diferencias en la respuesta química de las pulpas recuperadas

***Nota.** Los valores provienen de investigaciones independientes y no de un mismo diseño experimental.

Los resultados muestran que las modificaciones en la composición de las fibras pueden producirse mediante diferentes mecanismos de separación y purificación. La clasificación mecánica permite eliminar fracciones con mayor contenido de impurezas, mientras que los tratamientos químicos pueden reducir la presencia de componentes minerales y orgánicos. No obstante, los estudios

CC BY NC ND

analizados emplearon diferentes procedimientos de caracterización, por lo que no fue posible establecer una comparación directa y homogénea de las fracciones α-, β- y γ-celulosa entre las tecnologías revisadas. Esta limitación evidencia la importancia de utilizar métodos analíticos equivalentes al comparar los grados de purificación de fibras provenientes de diferentes investigaciones.

Caracterización fisicoquímica y térmica mediante FTIR y TGA

La caracterización fisicoquímica y térmica de las fibras celulósicas recuperadas permite complementar la información obtenida mediante los análisis de composición y examinar posibles modificaciones asociadas a los tratamientos de destintado y de purificación. Entre las técnicas utilizadas destacan la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), que proporciona información sobre los grupos funcionales presentes, y el análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés), que permite evaluar la pérdida de masa en función de la temperatura. Combinar estas técnicas es especialmente importante para analizar materiales recuperados, que pueden conservar componentes residuales tras el procesamiento.

En una investigación [2], los autores utilizaron la técnica FTIR-ATR para caracterizar fibras celulósicas recuperadas de residuos de papel después de aplicar tratamientos de extracción química. El análisis permitió identificar señales asociadas a los grupos funcionales de la celulosa y evaluar las diferencias en su organización estructural. Los investigadores emplearon las relaciones de absorbancia entre las bandas cercanas a 1429, 896 y 1050 cm-1 como indicadores de la contribución relativa de regiones ordenadas y menos ordenadas. Estos resultados demuestran que la espectroscopía infrarroja puede aportar información sobre las características estructurales de las fibras recuperadas; sin embargo, la interpretación de estos indicadores debe considerar las limitaciones de las relaciones espectrales y la posible superposición de bandas de diferentes componentes.

Asimismo, se ha reportado el uso de FTIR y TGA para caracterizar materiales recuperados a partir de residuos de papel con diferentes proporciones de celulosa. En una investigación [10], los autores compararon diferentes técnicas para determinar el contenido de celulosa en mezclas de fibras y polietileno procedentes de procesos de reciclaje. Los resultados mostraron que la técnica FTIR-ATR permitió identificar bandas características de la celulosa, principalmente en el intervalo de 900 a 1200 cm-1. Sin embargo, su aplicación cuantitativa presentó limitaciones en muestras heterogéneas, especialmente cuando el contenido de celulosa fue inferior a 5 %. Por otra parte, el análisis TGA permitió distinguir etapas de degradación asociadas a los componentes del material y proporcionó resultados comparables a los obtenidos mediante hidrólisis ácida y cromatografía para determinar el contenido de celulosa. Aunque esta investigación utilizó residuos de envases multicapa, sus resultados evidencian la importancia de emplear técnicas complementarias para caracterizar materiales secundarios de composición heterogénea.

En relación con el efecto de los tratamientos de recuperación, autores [4] reportaron modificaciones en las características estructurales de fibras de papel residual después de aplicar ultrasonido y celulasas bacterianas. El análisis de las muestras tratadas permitió identificar diferencias morfológicas y estructurales, alcanzando un índice máximo de cristalinidad de 70.9 % en las condiciones evaluadas. Estos resultados sugieren que la aplicación conjunta de tratamientos físicos y enzimáticos puede modificar la organización de las regiones celulósicas, aunque su comportamiento depende de las condiciones de procesamiento y de las características iniciales del material.

Por otra parte, en otra investigación [11], se evaluó la obtención de nanocelulosa a partir de residuos de papel mediante hidrólisis enzimática, utilizando diferentes concentraciones de celulasa. Los

CC BY NC ND

investigadores obtuvieron materiales con distintas características morfológicas y valores de cristalinidad comprendidos entre 59.3 % y 81.7 % bajo las condiciones destacadas del estudio. Asimismo, el análisis termogravimétrico permitió identificar diferencias en la estabilidad térmica asociadas a la morfología de la nanocelulosa obtenida. Estos resultados indican que los tratamientos posteriores a la recuperación pueden modificar las características estructurales y térmicas de los materiales celulósicos, por lo que su evaluación es importante cuando se pretende destinarlos a aplicaciones que requieren propiedades específicas.

Es importante señalar que los valores de cristalinidad reportados por diferentes autores no deben compararse directamente cuando se emplean métodos de determinación, materias primas o tratamientos distintos. De manera similar, las temperaturas de degradación obtenidas mediante TGA pueden depender de la atmósfera, la velocidad de calentamiento, la composición y la preparación de las muestras. Por ello, la caracterización conjunta mediante FTIR y TGA debe interpretarse teniendo en cuenta las condiciones experimentales específicas de cada investigación, sin atribuir automáticamente las diferencias observadas a un mayor grado de pureza de la celulosa.

Asimismo, los tratamientos de blanqueo pueden provocar modificaciones químicas adicionales que requieren técnicas de caracterización complementarias. Investigadores [5] evaluaron los efectos de tratamientos de quelación y de blanqueamiento con peróxido sobre pulpas celulósicas mediante cromatografía de permeación en gel (GPC, por sus siglas en inglés) y espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés). Los autores encontraron que el control de los iones metálicos es importante para reducir las reacciones oxidativas que pueden modificar las cadenas de celulosa durante el blanqueo. Estos resultados permiten establecer que la evaluación de la calidad de las fibras recuperadas no debe limitarse a su composición y comportamiento térmico, especialmente cuando se aplican tratamientos químicos que pueden modificar su integridad molecular.

En conjunto, los estudios analizados muestran que FTIR y TGA constituyen herramientas complementarias para examinar las características fisicoquímicas y térmicas de las fibras celulósicas recuperadas. Sin embargo, conservar las bandas características de la celulosa o identificar una etapa principal de degradación térmica no basta por sí solo para demostrar que se han eliminado por completo las partículas de tinta, los aditivos u otros contaminantes. Por ello, para obtener materiales destinados a aplicaciones más exigentes, es necesario complementar estas técnicas con procedimientos específicos que permitan determinar la pureza y los contaminantes residuales.

Limitaciones de los procesos y perspectivas de aprovechamiento en membranas biomédicas

La recuperación de celulosa a partir de residuos de papel ha abierto nuevas posibilidades de aprovechamiento, como su transformación en películas, membranas y otros materiales poliméricos. Sin embargo, la selección de una tecnología de destintado y purificación debe considerar las características requeridas para la aplicación prevista, ya que un tratamiento capaz de mejorar determinadas propiedades del material no necesariamente genera condiciones adecuadas para todas sus posibles aplicaciones.

En una investigación [6], se obtuvieron membranas de nanocelulosa a partir de diferentes residuos de papel, incluidos papel de oficina, cartón y otros materiales secundarios, mediante procesos de pretratamiento y de autoensamblaje. Los investigadores reportaron que las membranas obtenidas a partir de papel de oficina alcanzaron una transmitancia de 50.8 %, mientras que aquellas elaboradas a partir de cartón corrugado presentaron una transmitancia de 50.63 % y una resistencia al plegado de 81 ciclos. Asimismo, encontraron que determinadas membranas preparadas sin tratamiento previo de destintado presentaron un comportamiento favorable en cuanto a las propiedades de barrera al vapor de agua y la resistencia al plegado. Estos resultados muestran que la influencia del

CC BY NC ND

destintado depende de las propiedades que se deseen obtener y que la selección de tratamientos adicionales debe justificarse en función de la aplicación final del material.

Por otra parte, investigadores [7] analizaron diferentes procedimientos para la fabricación de películas y membranas celulósicas, destacando que sus propiedades dependen de factores como la organización de las fibras, la estructura de la membrana y las condiciones de procesamiento. Los autores señalaron que las propiedades de transporte y de separación son aspectos importantes para evaluar el desempeño de estos materiales. En este sentido, las características fisicoquímicas de la celulosa constituyen un punto de partida para su transformación en membranas funcionales, aunque su comportamiento posterior también depende de la formulación y del procedimiento de fabricación empleado.

En el área biomédica, los materiales celulósicos han despertado interés por su capacidad de modificación química y por la posibilidad de obtener estructuras con propiedades ajustables. Autores [8] analizaron diversas aplicaciones biomédicas de la celulosa y sus derivados, identificando oportunidades relacionadas con el desarrollo de materiales funcionales y estructuras poliméricas destinadas al contacto con sistemas biológicos. Sin embargo, estas posibilidades no pueden extrapolarse directamente a fibras recuperadas de papel impreso, ya que la composición de las materias primas y la presencia de componentes residuales pueden modificar su comportamiento y conllevar riesgos asociados a su uso.

En este sentido, investigadores [9] destacaron la importancia de considerar la bioseguridad de los materiales celulósicos destinados a aplicaciones biomédicas, en particular en relación con las características de las partículas, sus propiedades superficiales y sus posibles interacciones con sistemas biológicos. Por otra parte, la identificación de sustancias químicas residuales en fibras provenientes de papel reciclado [2] evidencia que la recuperación de celulosa mediante procesos de destintado y purificación debe ir acompañada de evaluaciones complementarias cuando se pretende utilizar estos materiales en aplicaciones que requieren condiciones de seguridad especiales.

La Tabla 3 muestra los principales aspectos a considerar para orientar el aprovechamiento de fibras celulósicas recuperadas en el desarrollo de membranas biomédicas, diferenciando entre la información que puede obtenerse mediante su caracterización fisicoquímica y las evaluaciones adicionales requeridas

Tabla 3. Criterios de evaluación para el aprovechamiento potencial de fibras celulósicas recuperadas en membranas biomédicas.

Característica	Evaluación	Importancia
Composición celulósica	Determinación de fracciones celulósicas y componentes no celulósicos	Identificar las características químicas de las fibras recuperadas
Pureza del material	Cenizas, componentes residuales y análisis de contaminantes	Evaluar la presencia de sustancias provenientes del papel y sus tratamientos
Estructura química	FTIR y técnicas complementarias	Identificar grupos funcionales y posibles modificaciones químicas
Comportamiento térmico	TGA	Evaluar las etapas de pérdida de masa y la respuesta térmica del material
Propiedades de membrana	Ensayos mecánicos, de absorción y transporte	Determinar el comportamiento funcional según la aplicación prevista

CC BY NC ND

Seguridad biológica	Pruebas de citotoxicidad, biocompatibilidad y otras específicas de la aplicación	Establecer la aptitud del material para contacto con sistemas biológicos

***Nota.** Los criterios constituyen una síntesis técnica elaborada a partir de las investigaciones revisadas [2, 7-9]. No representan resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo.

La revisión de la literatura permite identificar que las tecnologías de destintado y purificación pueden contribuir a la recuperación de fibras celulósicas con características adecuadas para su posterior transformación en materiales poliméricos. Sin embargo, las diferencias en los procedimientos experimentales, la composición de las materias primas y las técnicas de caracterización limitan la comparación directa de los resultados disponibles. Asimismo, la información revisada indica que la obtención de celulosa con determinadas características fisicoquímicas no constituye evidencia suficiente para demostrar su idoneidad para aplicaciones biomédicas.

Por lo tanto, el aprovechamiento de fibras provenientes de papel impreso debe contemplar una secuencia de evaluación que incluya la recuperación y purificación del material, la caracterización fisicoquímica, la fabricación de las membranas y la determinación de sus propiedades funcionales y de seguridad. En este sentido, los resultados analizados destacan el destintado y la purificación como etapas clave en la valorización de las fibras secundarias. Asimismo, establecen criterios que pueden orientar futuras investigaciones sobre el desarrollo de membranas con potencial de aplicación biomédica.

CONCLUSIONES

El análisis de las investigaciones seleccionadas permitió identificar diversas estrategias para la recuperación y purificación de fibras celulósicas procedentes de residuos de papel. Los tratamientos enzimáticos y asistidos por ultrasonido pueden favorecer el desprendimiento y la separación de las partículas de tinta, mientras que los procedimientos químicos y de clasificación permiten reducir las cargas minerales y otros componentes residuales. Sin embargo, la efectividad de cada tecnología depende de las características de la materia prima, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades requeridas para la aplicación final.

La composición de las fibras, junto con su caracterización mediante FTIR y TGA, constituye una herramienta para evaluar las modificaciones asociadas a los tratamientos y para valorar las características de la celulosa recuperada. No obstante, las diferencias entre los métodos experimentales empleados en las investigaciones revisadas limitan la comparación directa de ciertos parámetros y evidencian la necesidad de establecer criterios de caracterización equivalentes.

La celulosa recuperada del papel residual tiene potencial para su transformación en películas y membranas de mayor valor agregado. Sin embargo, cuando se considera una posible aplicación biomédica, la caracterización fisicoquímica no resulta suficiente para demostrar la idoneidad del material. Es necesario complementar la recuperación y purificación de las fibras con evaluaciones de contaminantes residuales, de propiedades funcionales, de citotoxicidad y de biocompatibilidad. Por lo tanto, el destintado y la purificación constituyen etapas iniciales para la valorización de fibras secundarias y sientan las bases para investigaciones posteriores orientadas al desarrollo de membranas con potencial de aplicación biomédica.

CC BY NC ND

REFERENCIAS

1. Reynolds, A.M., et al., Fractionation by classification as a prerequisite to the purification of old corrugated container material for preparing dissolving grade pulp: AM Reynolds et al. Cellulose, 2025. 32(10): p. 6209-6228.

2. Kucbel, M., et al., Removal of fillers and chemical reagents from waste paper for its sustainable use. Environmental Science and Pollution Research, 2025. 32(45): p. 25730-25753.

3. Mondal, S., et al., Biodeinking of waste papers using combinatorial fungal enzymes and subsequent production of butanol from effluent. Bioresource technology, 2022. 353: p. 127078.

4. Gea, S., et al., Ultrasound pretreatment and enzymatic deinking by using bacterial cellulases from rice husk. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2023. 43(3): p. 117-128.

5. Goto, T., et al., Evaluating chelating agents and their effects on cellulosic pulps during P-stage bleaching. Part 1: analytical method development. Cellulose, 2023. 30(6): p. 3887-3900.

6. Lei, W., et al., A study on preparation of low-cost environment-friendly self-assembled nanocellulose membrane from waste paper. Industrial Crops and Products, 2024. 221: p. 119453.

7. Grzybek, P., G. Dudek, and B. van der Bruggen, Cellulose-based films and membranes: A comprehensive review on preparation and applications. Chemical Engineering Journal, 2024. 495: p. 153500.

8. Cheng, W., et al., Sustainable cellulose and its derivatives for promising biomedical applications. Progress in Materials Science, 2023. 138: p. 101152.

9. Li, Y., et al., Biosafety consideration of nanocellulose in biomedical applications: A review. International journal of biological macromolecules, 2024. 265: p. 130900.

10. Kauppi, E., et al., Quantifying cellulose content in plastic-cellulose material mixtures. Cellulose, 2024. 31(16): p. 9613-9621.

11. Lei, W., et al., Controllable preparation and morphology regulation of nanocelluloses from waste paper by a green hydrolysis method. International Journal of Biological Macromolecules, 2024. 280: p. 135658.

CC BY NC ND