

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**“EFECTO DE CELULOSA NANOFIBRILAR DE BAMBÚ (*Guadua  
angustifolia* Kunth) EN PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS DE  
PAPEL ELABORADO CON FIBRA VIRGEN Y RECICLADA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL**

**WINNIFER BRUNELLA ATÚNCAR VILELA**

**LIMA-PERÚ**

**2022**

---

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**“EFECTO DE CELULOSA NANOFIBRILAR DE BAMBÚ (*Guadua  
angustifolia* Kunth) EN PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS DE  
PAPEL ELABORADO CON FIBRA VIRGEN Y RECICLADA”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL**

**WINNIFER BRUNELLA ATÚNCAR VILELA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

.....  
*Ing. Manuel Chavesta Custodio, Dr.  
Presidente*

.....  
*Ing. Florencio Teodoro Trujillo Cuellar, Dr.  
Miembro*

.....  
*Lic. Quim. Deysi Rocío Guzmán Loayza, Mg.Sc.  
Miembro*

.....  
*Ing. Héctor Enrique Gonzáles Mora, Dr.  
Asesor*

.....  
*Ing. Aldo Joao Cárdenas Oscanoa, Mg.Sc.  
Co-asesor*

## ***DEDICATORIA***

*A mis padres por todo el amor y el apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*No puedo culminar este camino sin agradecer a todos los que de alguna forma fueron parte de esta tesis, que con su ayuda, consejos, sabiduría y palabras de aliento permitieron que este trabajo se realizara.*

*Al proyecto de investigación "Papel de envoltura para alimentos elaborado con fibra de bambú y reciclada, reforzada con nanocelulosa", contrato N° 187-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV y financiado por CONCYTEC, PROCIENCIA y el BANCO MUNDIAL.*

*Al profesor Héctor Gonzales Mora quien fue una guía durante todo este proceso y sin sus enseñanzas no lo hubiera logrado. Al profesor Aldo Cárdenas le agradezco por la exigencia y minuciosidad en todo momento. De igual forma, a la profesora Deysi Guzmán por su disposición a ayudarme siempre, al Sr. Cabrera que con sus consejos salí de varios apuros y a Marco, por todo el apoyo.*

*A Paola y Cinthia, por todos los días de laboratorio, la amistad y apoyo incondicional, a Cinthya, Cesar y Diana, por las buenas vibras y ánimos. A todos ellos, su amistad fue, es y será siempre el soporte de todo lo que hago.*

*A mi familia, sobre todo a Giovanna, Betsabé, mis padres y mis hermanos, por todo el amor que me brindan y la confianza que tienen en mí.*

*Y aquellas personas que de alguna forma influyeron en cada paso de esta investigación.*

*A todos, mi eterno agradecimiento.*

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE ANEXOS.....	10
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	12
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	3
2.2. La industria del papel.....	4
2.2.1. Fibras no madereras .....	5
2.2.2. Fibras recicladas o secundarias .....	6
2.2.3. Procesos de elaboración del papel.....	7
2.3. Nanocelulosa.....	10
2.3.1. Formas de obtención de nanocelulosa.....	12
2.4. Celulosa nanofibrilar (CNF) como refuerzo del papel.....	15
2.5. Otras aplicaciones .....	15
III. METODOLOGÍA .....	17
3.1. Área de estudio.....	17
3.2. Materiales, insumos y equipos .....	17
3.2.1. Reactivos .....	18
3.2.2. Materiales .....	19
3.2.3. Equipos .....	19
3.3. Métodos.....	20
3.3.1. Recolección de materia prima .....	21
3.3.2. Preparación de la materia prima.....	22
3.3.3. Obtención de pulpa de bambú .....	22
3.3.4. Desintegrado de DKL .....	23
3.3.5. Refinado de las fibras .....	24
3.3.6. Elaboración de celulosa nanofibrilar de bambú: .....	24
3.3.7. Adición de celulosa nanofibrilar en masa .....	27
3.3.8. Formación de hojas de papel.....	28
3.3.9. Evaluación del papel .....	29

3.4.	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	30
3.5.	Diseño experimental.....	30
3.6.	Análisis de los datos.....	32
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	33
4.1.	Obtención de pulpa de bambú.....	33
4.2.	Caracterización de fibras DKL.....	34
4.3.	Resultados del refinado .....	35
4.4.	Elaboración de CNF.....	36
4.5.	Caracterización de la CNF .....	39
4.6.	Microscopía electrónica de los papeles .....	39
4.6.1.	Aplicación de CNF en papel de bambú.....	39
4.6.2.	Aplicación de CNF en papel DKL .....	40
4.6.3.	Aplicación de CNF en papel mezcla .....	41
4.7.	Evaluaciones de los papeles aplicando CNF.....	42
4.7.1.	Propiedades físicas .....	43
4.7.2.	Propiedades mecánicas .....	49
4.8.	Selección del mejor tratamiento.....	58
V.	CONCLUSIONES .....	61
VI.	RECOMENDACIONES .....	62
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	63
VIII.	ANEXOS.....	78

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Diámetros y alturas de las cañas de bambú.....	21
Tabla 2: Condiciones del primer pulpeo de <i>Guadua angustifolia</i> .....	23
Tabla 3: Condiciones del segundo pulpeo de <i>Guadua angustifolia</i> .....	23
Tabla 4: Secuencia de blanqueo.....	25
Tabla 5: Condiciones previas de la pulpa de <i>Guadua angustifolia</i> para elaborar CNF. ....	25
Tabla 6: Combinaciones de fibra en la elaboración del papel con aditivo de CNF. ....	28
Tabla 7: Ensayos del papel.....	29
Tabla 8: Diseño experimental de las combinaciones de fibra en la elaboración del papel con aditivo de CNF.....	31
Tabla 9: Pulpeo de <i>Guadua angustifolia</i> para elaboración del papel.....	33
Tabla 10: Valores porcentuales de fracción de fibras de DKL obtenidas en el clasificador Bauer McNett. ....	34
Tabla 11: Control del refinado sobre la pasta de los papeles obtenidos.....	35
Tabla 12: Resultados del pulpeo y blanqueo de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	36
Tabla 13: Análisis estadístico de la permeabilidad del papel en los diferentes tratamientos con CNF.....	47
Tabla 14: Análisis estadístico de la resistencia a la tensión en los diferentes tratamientos, con CNF, en los papeles de bambú, DKL y su mezcla. ....	50
Tabla 15: Análisis estadístico de la resistencia a la tracción en los diferentes tratamientos con CNF en los papeles de bambú, DKL y su mezcla. ....	52
Tabla 16: Análisis estadístico de la resistencia al rasgado en los diferentes tratamientos con CNF en los papeles de bambú, DKL y su mezcla. ....	54
Tabla 17: Análisis estadístico de la resistencia al plegado en los diferentes tratamientos con CNF en los papeles de bambú, DKL y su mezcla. ....	56
Tabla 18: Selección del mejor tratamiento.....	58

## Índice de figuras

Figura 1: Esquema de fibrilar elemental a celulosa.....	11
Figura 2: Términos estándar propuestos para los nanomateriales.....	12
Figura 3: Extracción de CNC a partir de fibras de celulosa.....	14
Figura 4: Extracción de CNF a partir de fibras de celulosa.....	14
Figura 5: Lugares de colecta para <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	18
Figura 6: Flujograma del presente estudio .....	21
Figura 7: Preparación de la materia prima de bambú (izquierda) y papel DKL (derecha). ..	22
Figura 8: Refinador PFI.....	24
Figura 9: Pulpa blanqueada luego del pre tratamiento químico.....	26
Figura 10: Homogenizado de CNF a altas revoluciones.....	27
Figura 11: Formación de papel de DKL.....	29
Figura 12: Evolución de la deslignificación de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	37
Figura 13: Pulpa de <i>Guadua angustifolia</i> sin blanquear.....	37
Figura 14: Pulpa de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth blanqueada.....	38
Figura 15: De izquierda a derecha: cambio desde el pre tratamiento hasta el tratamiento mecánico de la CNF.....	38
Figura 16: Apariencia final de la CNF (izquierda) y vista al microscopio (centro e izquierda).....	39
Figura 17: Papel de bambú con diferentes concentraciones de CNF al (A) 0 %; (B) 2 %; (C) 4 % y (D) 6 % de concentración.....	40
Figura 18: Papel DKL con diferentes concentraciones de CNF al (A) 0 %; (B) 2 %; (C) 4 % y (D) 6 % de concentración.....	41
Figura 19: Papel mezcla con diferentes concentraciones de CNF al (A) 0 %; (B) 2 %; 6 % concentración.....	42
Figura 20: Efecto de la CNF, en los tratamientos, sobre el gramaje de los papeles obtenidos.....	43
Figura 21: Efecto de la CNF, en los tratamientos, sobre el espesor de los papeles obtenidos. .....	45
Figura 22: Efecto de la CNF, en los tratamientos, sobre la densidad de los papeles obtenidos.....	46
Figura 23: Variación de la permeabilidad del papel en función a la aplicación de CNF (A) y a la CNF (B). .....	48

Figura 24: Resistencia a la tensión en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).....	51
Figura 25: Resistencia a la tracción en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).....	53
Figura 26: Resistencia al rasgado en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).....	55
Figura 27: Resistencia al plegado en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).....	57

## *Índice de Anexos*

Anexo 1: Ficha técnica del oxidante TEMPO.....	78
Anexo 2: Base de datos. ....	79
Anexo 3: Análisis estadístico de la permeabilidad Gurley.....	92
Anexo 4: Análisis estadístico de la resistencia a la tensión.....	93
Anexo 5: Análisis estadístico de la resistencia a la tracción. ....	94
Anexo 6: Análisis estadístico de la resistencia al rasgado.....	95
Anexo 7: Análisis estadístico de la resistencia al plegado. ....	96

## RESUMEN

La búsqueda de mejoras en la industria de papel ha impulsado el uso de nuevas materias primas, modificaciones y aditivos para su elaboración, esto ha abierto una vía para la implementación de la nanotecnología utilizando la nanocelulosa como elemento prometedora en la mejora de sus propiedades. El objetivo del presente estudio fue la aplicación de la celulosa nanofibrilar (CNF) proveniente de tallos de bambú, de la especie *Guadua angustifolia* Kunth, como aditivo en tres tipos de papel elaborados con: fibra virgen de bambú, fibras recicladas de DKL y la mezcla de ambos. Para así evaluar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los papeles. La CNF fue obtenida aplicando un pretratamiento químico con el oxidante TEMPO y un tratamiento mecánico con un homogenizador a 25000 RPM. La CNF fue adicionada durante la elaboración del papel en las concentraciones de 0, 2, 4 y 6 % para cada tipo. El diseño de la investigación fue factorial y los datos fueron revisados mediante un análisis de varianza y las pruebas no paramétricas de comparaciones múltiples, Kruskal-Wallis y Mediana.

Los resultados revelaron que la CNF ocasionó una disminución del gramaje y la densidad del papel de bambú al agregar 6 % del aditivo. Asimismo, se destaca la reducción del 92 % de la permeabilidad Gurley en el papel mezcla. En cuanto a las propiedades mecánicas, aumentos en la tensión y la tracción se observaron al agregar 6 % al papel DKL. El plegado reveló aumentos de 4 y 5 veces más en el papel de bambú y mezcla, esto al agregar 4 y 6 % de CNF, respectivamente. Por lo cual, se comprueba que la adición de CNF en el papel influye en las propiedades físicas y mecánicas. Además, la cantidad de CNF que se utiliza en el papel se encuentra en relación al producto final que se desea elaborar y su aplicación.

### PALABRAS CLAVE

*Guadua angustifolia* Kunth; fibras recicladas; CNF; aditivo; industria papelera.

## ABSTRACT

The search for improvements in the paper industry has promoted the use of new raw materials, modifications and additives for its production, this has opened a path for the implementation of nanotechnology using nanocellulose as a promising element in improving its properties. The objective of this study was the application of nanofibrillar cellulose (NFC) from bamboo stems, of the *Guadua angustifolia* Kunth species, as an additive in three types of paper made with: virgin bamboo fiber, recycled DKL fibers and the mixture from both. In order to evaluate the behavior of the physical and mechanical properties of the papers. The CNF was obtained by applying a chemical pretreatment with the TEMPO oxidant and a mechanical treatment with a homogenizer at 25,000 RPM. The CNF was added during the elaboration of the paper in the concentrations of 0, 2, 4 and 6% for each type. The research design was factorial and the data were reviewed using an analysis of variance and non-parametric tests for multiple comparisons, Kruskal-Wallis and Median.

The results revealed that the CNF caused a decrease in the grammage and density of the bamboo paper when adding 6% of the additive. Likewise, the 92% reduction in Gurley permeability in mixed paper stands out. Regarding the mechanical properties, increases in tension and traction were observed when adding 6% to the DKL paper. Folding revealed 4- and 5-fold increases in bamboo and blend paper, this by adding 4 and 6% CNF, respectively. Therefore, it is verified that the addition of CNF in the paper influences the physical and mechanical properties. In addition, the amount of CNF used in the paper is related to the final product to be produced and its application.

## KEYWORDS

*Guadua angustifolia* Kunth; recycled fibers; CNF; additive; paper industry.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la nanocelulosa se ha convertido en un material innovador que ha despertado interés en investigadores, académicos y de la industria, por la versatilidad y potencial del material en sus aplicaciones. La nanocelulosa es un derivado de la celulosa y para obtenerla es sometida a un proceso de separación de sus elementos hasta llegar a un nivel microscópico. El uso del bambú es particularmente interesante debido a la gran disponibilidad de este recurso proveniente de plantaciones realizadas en el Perú. La celulosa al ser un elemento abundante en la naturaleza, puede ser obtenida de fibras de diferentes fuentes como la madera, bambú, residuos agrícolas o plantas anuales. Por lo tanto, la nanocelulosa se considera un material abundante, renovable y biodegradable, de igual forma, características como su resistencia, transparencia y ligereza es lo que la convierte en un material de interés mundial (Eichorn *et al.*, 2010; Delgado, 2015).

El uso del papel ha sido registrado desde hace miles de años, debido a su versatilidad y variedad de propiedades como la renovabilidad, capacidad de reciclaje y flexibilidad mecánica. Esto permite una amplia capacidad de modificación en sus propiedades. El papel está compuesto principalmente por fibras que contienen celulosa, las cuales pueden extraerse de la madera dura, madera blanda o de materiales no madereros (Ioelovich, 2009; Samyn *et al.*, 2018). Asimismo, la constante evolución de la industria papelera abre paso a nuevos desafíos entre los que se identifica, el aumento de los rendimientos en la obtención de las fibras de madera, disminución del uso de los recursos forestales, crecimiento del protagonismo de las fibras recicladas o secundarias. Estos últimos son consideradas como desechos, por lo cual reutilizar y reciclar estos residuos podría minimizar impactos ambientales y ciertos problemas relacionados con su acumulación (Delgado *et al.*, 2015b; Motaung & Linganiso, 2018).

La industria del papel ha impulsado la investigación y el desarrollo para la búsqueda de nuevas materias primas con perfil industrial, modificaciones del papel, adición de aditivos, estrategias para mejorar los enlaces entre las fibras del papel y sus cargas para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los papeles y cartones (Lengowski *et al.*, 2019). Esto da paso al uso de la nanotecnología en la fabricación del papel utilizando derivados de celulosa como la nanocelulosa, la cual posee propiedades prometedoras. Además, funciona como una herramienta para optimizar los procesos y los productos de la industria papelera como, por ejemplo, mayor eficiencia en el uso de recursos, uso de materiales reciclados y mejoras en las propiedades físicas y mecánicas (Giri & Adhikari, 2013; Samyn *et al.*, 2018).

Las diversas propiedades de la nanocelulosa y la compatibilidad que tiene con los materiales como el papel, le permite desarrollar su función como aditivo funcionando como refuerzo, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas. Por lo cual, se entiende el interés por parte de la industria papelera, al verla como una mejora tecnológica en sus procesos o de los productos finales del papel. Es así, que el presente estudio tiene como objetivo aplicar la nanocelulosa proveniente de tallos de bambú, de la especie *Guadua angustifolia* Kunth, como aditivo en tres tipos de papel elaborados con fibra virgen, fibras recicladas y la mezcla de ambos, para evaluar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los papeles.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. *Guadua angustifolia* Kunth

La *Guadua angustifolia* taxonómicamente pertenece a la familia Poaceae, a la subfamilia Bambusoideae y al género *Guadua*, es un bambú endémico de América y fue descrito por primera vez por Kunth en 1822 (Gutiérrez, 2011). *Guadua angustifolia* es el bambú tropical de mayor importancia económica en América, es la especie ampliamente usada en Colombia y Ecuador; se extiende hacia el norte hasta la Venezuela Andina y hacia el sur hasta la frontera peruano-ecuatoriana. Es así, que el Perú es uno de los países Andinos con mayor riqueza en diversidad de bambúes, donde se han registrado 37 especies y 8 géneros. Entre estos destaca la especie *Guadua angustifolia* Kunth (Judziewicz *et al.*, 1999; Londoño, 2013).

En forma de bosque natural, esta especie, puede ser encontrada en las regiones del noreste del país, especialmente en Amazonas, San Martín, Cajamarca y en menor cantidad en Tumbes y Piura. Pero en la costa norte del Perú es la especie de bambú predominante, con diferentes usos tanto en la zona urbana como en la rural; es utilizada en su forma natural y en distintos grados de transformación. La parte más usada del bambú es el tallo también conocido como culmo, tiene utilidad como planta para protección, en distintas formas para la construcción, mueblería y artesanía (Lopez, 2011; Añazco & Rojas, 2015).

El bambú es considerada una de las especies más importantes del mundo, debido a su gran resistencia y durabilidad, esto como consecuencia de sus características físicas. Los culmos de bambú poseen diámetros que varían de 10 a 22 cm y con alturas entre los 17 a 23 m pudiendo alcanzar hasta 30 metros en seis meses, destacando por su alta velocidad de crecimiento, diversas investigaciones han reportado crecimientos entre 10 a 15 cm por día. Además, resalta entre otras especies de bambú debido a sus culmos largos y espinosos con bandas de pelos blancos en la región del nudo y por las hojas caulinares de forma triangular (Añazco & Rojas, 2015).

Los culmos de *G. angustifolia* están compuestos en un 51 por ciento de tejido parenquimatoso, 40 por ciento de fibra y 9 por ciento de células conductoras. Las fibras que los componen se caracterizan por su forma esbelta, larga y cónicas en sus extremos y a veces bifurcadas. La longitud de la fibra tiene influencia en la fuerza del culmo y en las propiedades requeridas para obtener pulpa para papel. Entre otros parámetros físicos de las fibras de *G. angustifolia*, se consideran longitudes de fibra de 1,7 mm hasta 4 mm, anchos de fibra 14  $\mu$ , ancho de lumen de 9  $\mu$  y espesores de pared de 2,5  $\mu$  (Londoño, 2002).

En cuanto a la composición química de *G. angustifolia*, se reportan valores de contenido de lignina entre 23 a 27 por ciento; de celulosa del 37 a 44 por ciento y hemicelulosas del 13 al 20 por ciento. En el caso de madera, los valores oscilan para lignina entre 18 a 35 por ciento, celulosa de 40 a 50 por ciento y hemicelulosa de 25 a 35 por ciento. Por lo tanto, *G. angustifolia* es considerada como material natural comparable al material de alimentación de biomasa donde su alto contenido de celulosa y hemicelulosa podría utilizarse para la producción de etanol y papel (Gómez, 2012; Sánchez *et al.*, 2014).

## **2.2. La industria del papel**

Durante casi 2000 años el papel se ha fabricado utilizando diferentes fuentes, fibras de origen vegetal, animal y origen sintético. Siendo las más representativas las fibras de origen vegetal o también llamadas celulósicas, estas se derivan en dos grandes grupos, las fibras madereras y no madereras. Siendo las fibras madereras las más utilizadas por la industria del papel, es necesario considerar los tipos de madera que existen según el largo de su fibra (larga o corta). Es así que, las fibras largas (coníferas) pueden tener longitudes que varían entre 3 a 5 mm y con diámetro de 20 a 50  $\mu$ m, en tanto que las de fibra corta (latifoliadas) poseen longitudes aproximadas de 1 a 2 mm con diámetros de 10 a 40  $\mu$ m de diámetro (Torres *et al.*, 2005; Izarga *et al.*, 2007).

De acuerdo como la industria de papel ha desarrollado, han aumentado las exigencias ambientales y por ende los desafíos a los que se enfrenta este sector, como la creciente amenaza en el suministro de madera lo cual dificulta la continuidad del sector. Esto ha ocasionado en la industria de pulpa y papel una búsqueda de alternativas en fibras diferentes

de la madera, buscando materias primas con disponibilidad y calidad (Bousios & Worrel, 2017; Lopez *et al.*, 2021).

### **2.2.1. Fibras no madereras**

Las materias primas no madereras, han aparecido como una oportunidad debido a su variedad y disponibilidad. A pesar que, actualmente representan menos del 10 por ciento de la producción total de pulpa y papel, en ciertos países en desarrollo, aproximadamente el 60 % de la fibra de celulosa proviene de estas fibras. En todo el mundo, esto comprende, en porcentaje: 44 de paja, 18 de bagazo, 14 de cañas, 13 de bambú y 11 otros como la caña, el yute, el lino, el sisal, etc (Azeez, 2018; Liu *et al.*, 2018).

Las fibras no madereras (no leñosas) son aquellas provenientes de plantas no leñosas anuales con un potencial fibroso máximo en una estación definida, de este material es posible extraerse fibras para fabricar papel (Pande, 1999).

Hurther (2001) afirma que generalmente las fibras vegetales no maderables se pueden agrupar en dos grandes categorías:

- No maderas comunes o sustitutos de la madera dura, como paja de cereales, bagazo de caña de azúcar, bambú (especies de fibras más cortas), cañas y pastos, esparto, kenaf (tallo entero o fibra central), tallos de maíz, tallos de sorgo, etc.
- Sustitutos especiales de maderas nobles o maderas blandas, tales como algodón básico y linters; fibras de lino, cáñamo y kenaf líber; sisal; abacá; bambú (especies de fibra más largas); hesperaloe etc.

Estos recursos son considerados como fuentes alternativas válidas de celulosa para la producción de pulpa y papel. Propiedades como el elevado rendimiento, la alta calidad de pulpeo, favorable adaptación a las condiciones climáticas y su bajo costo, los convierten en material adecuado para la industria de papel. De estas fibras no madereras se debe destacar al bambú utilizado en los procesos de producción de papel, ya que los rendimientos en pulpeo químico son similares a los de madera, con longitudes de fibras mayores a las maderas,

además otra ventaja significativa del bambú es su corto periodo de cosecha, siendo cuatro años en promedio versus los 8 a 12 años que demora la madera para pulpa. Un claro ejemplo es el de China, con una producción de pulpa de bambú que se encuentra en tendencia ascendente con un alza del 2,7 por ciento el año 2000 hasta un 21,4 por ciento el 2015 (Gonzales, 2005; Azeez, 2018; Liu *et al.*, 2018).

### **2.2.2. Fibras recicladas o secundarias**

Las fibras secundarias o fibras recicladas se definen como cualquier material fibroso que, habiendo sido procesado, es reciclado como materia prima para otro producto manufacturado. La fibra secundaria es la segunda fuente importante para la elaboración de papel y cartón en los países desarrollados, y su principal desafío consiste en obtener un papel con propiedades similares a los papeles manufacturados con fibras de primera generación, fibra virgen. Debido a sus bajos costos, las fibras secundarias resultan atractivas para las empresas que fabrican papel, además su disponibilidad la convierte en una alternativa para la industria de celulosa y papel en todo el mundo, así como un sustituto rentable y competitivo de las pulpas químicas y de alto rendimiento (Mabee, 1999; Aguilar, 2004; Pélach *et al.*, 2012). Otra consideración es la concientización de la sociedad sobre el uso de los recursos forestales, el agua y su relación con la producción de pulpa y papel, lo cual ha reforzado el uso de las fibras secundarias (Turrado *et al.*, 2008).

Se han identificado dos importantes tipos de fibras secundarias o recicladas: la pasta DKL (double-liner kraft linerboard) y pasta OCC (old container corrugated), la primera proveniente del material de descarte en fábrica y el segundo es el reciclado post consumo (Gonzales, 2010; Area, 2017). Estas se describen a continuación:

#### **a. Double Kraft Liner (DKL)**

El DKL proviene de las plantas corrugadoras, siendo los residuos de cartón o láminas de cartón originados en el proceso de troquelado en la fabricación de cajas, bolsas, sacos, entre otros, los cuales no han tenido ningún tipo de uso para el que fue elaborado. La calidad de este papel no acepta adhesivos no solubles, rollos desbastados o triturados, materiales no permitidos, con bajos niveles de impureza y una humedad máxima del 10 por ciento. Este tipo de papel es utilizado en la producción de kraft liner, debido a que da una mejor calidad

al producto, ya que se trata de una fibra casi virgen (CARTOPEL, s.f.; Palacios & Vallejos, 2011; Moreno, 2015; SOREPA, 2018; Cali & Remache, 2019). En el Perú, diversas empresas papeleras utilizan el DKL. La Empresa CARVIMSA (S.f.), elabora papeles domésticos utilizando en su formulación un porcentaje de OCC y un porcentaje de DKL, la combinación de ambos tiene propiedades de resistencia, sumando los químicos y la refinación de algunos de ellos. Otras empresas como TRUPAL S.A, importan el papel DKL para adicionarlo en sus procesos (RD N°0048-2018-MINAM).

#### **b. Old Corrugated Containers (OCC)**

Los embalajes corrugados luego de uso son comúnmente llamados “cartones” pero los expertos de la industria los denominan OCC o cartón corrugado. La utilización de OCC como fibra de segundo uso, está aumentando dentro de la industria y destaca por ser una fuente potencial gracias a su cantidad, capacidad de recolección, la disminución de costos en su proceso de manufactura y ser ambientalmente atractivo. Este es fácilmente reconocido debido a su estructura formada por múltiples capas, con una capa intermedia ondulada o estriada y entre las hojas de papel mantiene un cartón ondulado ligera que le brinda resistencia. Asimismo, este material es utilizado como materia prima en la elaboración de papel tipo liner, papel corrugado o como reemplazo en cierto porcentaje de pulpas vírgenes sin crear pérdidas de resistencia en el papel (Rivera *et al.*, 2008; Wistara *et al.*, 2012; Teixeira, 2012; Gulsoy *et al.*, 2013; Jahan *et al.*, 2016). Pero se debe tener en consideración que al ser fibras reutilizadas su calidad es menor que otros cartones como el DKL, y al ingresar a nuevos procesos, en sus fibras puede ocurrir la hornificación; lo cual trae como consecuencia una disminución perceptible de la plasticidad de la fibra, propiedades de tensión, el índice de rotura, incrementa la fragilidad y aumenta la cantidad de finos en la elaboración del papel (Yang *et al.*, 2012).

### **2.2.3. Procesos de elaboración del papel**

#### **a. Pulpeo químico alcalino, aditivos**

Las técnicas de pulpa pueden clasificarse como mecánicas, métodos térmicos, semi químicos o totalmente químicos. Los métodos químicos que se han desarrollado en la fabricación de pasta incluyen los procesos de fabricación de pasta Kraft, sulfito, soda y organosolv,

comprendiendo varias formas, desde procesos fuertemente alcalinos, como el Kraft, hasta fuertemente ácidos (Lwako *et al.*, 2013; Ruiz, 2004). Dentro de lo mencionado es el proceso Kraft, el dominante dentro de la industria debido a las ventajas en la recuperación química y la resistencia de la pulpa. Este proceso evolucionó a partir de un proceso anterior de soda (utilizando solo hidróxido de sodio como producto químico activo) y agrega sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) a la formulación química de cocción, los cuales reaccionan generando la disolución de la lignina generando la separación de las fibras de celulosa. En este proceso se puede utilizar cualquier tipo de materia prima fibrosa, ya que este proceso tolera corteza haciendo más flexible el suministro de materia prima (Altamirano 2010; Bajpai 2010; Rolón, 2016).

En los procesos de pulpeo alcalino, Kraft, existen diversos aditivos que estabilizan los polisacáridos para evitar su degradación, entre los cuales destaca la antraquinona, la cual produce una estabilización de los carbohidratos, para evitar que inicien la reacción de peeling aumentando así el rendimiento de la pulpa debido a que preserva la integridad de la fibra. Su uso aumenta la velocidad de deslignificación, lo cual permite una reducción en el tiempo de pulpeo, disminuye la temperatura y aumenta el rendimiento de la pulpa (Hart & Rudie, 2004; Tapia, 2005; Quintana 2011).

A pesar, de que el pulpeo químico posee una baja tasa de conversión de la materia prima (40%-50%) y requiere un importante tratamiento de desechos y operaciones de reciclado de químicos; las pulpas producidas químicamente tienen una alta resistencia empleándose principalmente en papeles finos del tipo impresión-escritura (González & Garay citado por Ruiz, 2004).

El control de las propiedades químicas de la pulpa se realiza mediante el índice Kappa, que, determina el grado de deslignificación de la pulpa estimando, en forma indirecta, la lignina residual. A través de la norma TAPPI T-236 el resultado se expresa a través del número Kappa, que mide la cantidad total de materia oxidable, en la pulpa, con  $\text{KMnO}_4$ . El método no distingue, sin embargo, entre materia oxidable en lignina residual y en otras estructuras, como ácidos hexenurónicos (HexAs), extractivos y grupos carbonilos en la pulpa (Costa & Colodette, 2007; Altamirano, 2010).

## **b. Proceso de blanqueamiento**

El objetivo del blanqueo es disolver (pasta química) o modificar (pasta mecánica) la lignina que no se eliminó durante los procesos de elaboración de la pulpa, manteniendo la integridad de las fibras. Comercialmente los reactivos más utilizados son el cloro gas (C), el hipoclorito (H), el peróxido de hidrógeno (P), el dióxido de cloro (D) y el álcali utilizado es el hidróxido de sodio (E) que se usa en la operación de extracción alcalina (Teschke & Demer, 1998; Marques, 2010).

Cadena (2008), afirma que el cloro elemental ha sido el principal agente oxidante utilizado tradicionalmente, pero siguiendo las normativas medioambientales restrictivas se ha logrado que la industria papelera elimine el uso del cloro elemental en la etapa de blanqueo, y sea sustituido por dióxido de cloro en los denominados blanqueos ECF (Elemental Chlorine Free), el cual domina la industria. Asimismo, los continuos avances tecnológicos en esta área han conseguido eliminar totalmente el uso del cloro elemental y sus derivados en las secuencias de blanqueo TCF (Totally Chlorine Free).

Parra citado por Reyes (2006) explica que en el blanqueo se realiza en una serie de etapas generalmente con un lavado entre cada una de ellas, esto se conoce como secuencia de blanqueo. Asimismo, menciona que el blanqueo de la pulpa de celulosa kraft, en un sistema ECF, se obtiene principalmente en cuatro o más etapas, donde en primer lugar se somete a una pre deslignificación con oxígeno (O), una etapa con dióxido de cloro (D), un proceso de extracción alcalina con hidróxido de sodio (E) y peróxido de hidrogeno (P), y finalmente se vuelve a tratar con dióxido de cloro (D).

## **c. Refinado**

El método de refinación o batido más comúnmente usado es tratar las fibras en presencia de agua con barras metálicas. Las placas o los rellenos están ranurados de modo que las barras que tratan las fibras y las ranuras entre las barras, permiten el transporte de la fibra a través de la máquina de refinación (Lumiaine, 1998).

Bajpai (2010), menciona que el objetivo principal de la refinación es desarrollar la capacidad de unión de las fibras sin reducir su resistencia individual ni dañándolas demasiado, al mismo tiempo que minimiza el desarrollo de la resistencia al drenaje. Los tipos de fibra reaccionan de manera distinta debido a las diferencias en sus propiedades morfológicas. Durante el refinado, las fibras sufren aleatoria y repetidamente fuerzas de tracción, compresión, corte y flexión. Generalmente, responden de tres maneras:

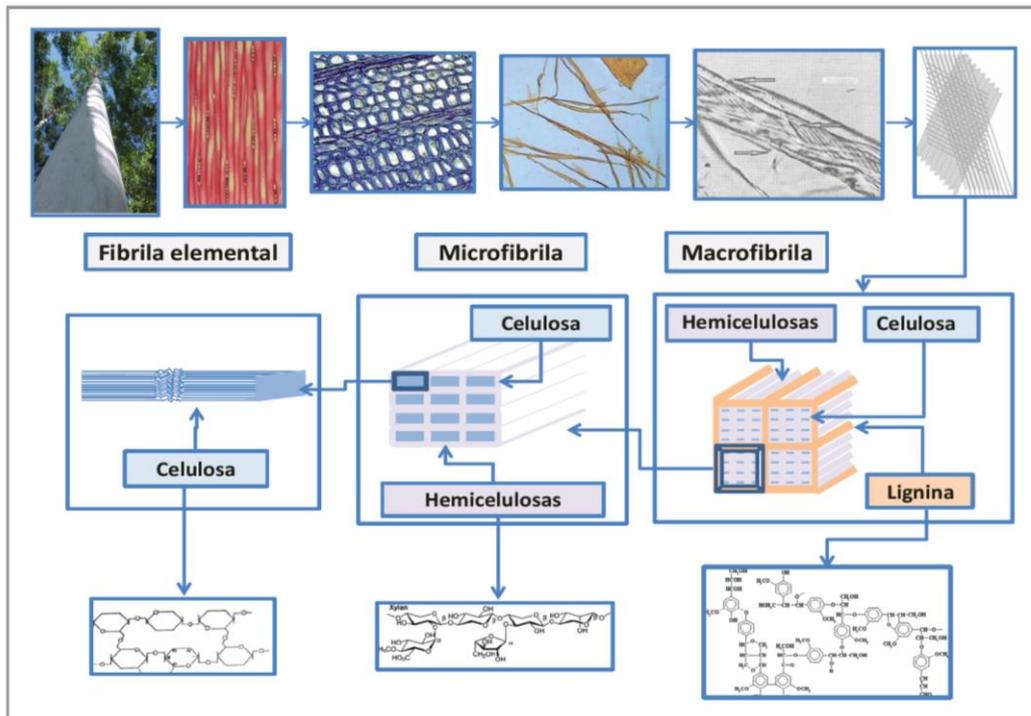
- Las fibras desarrollan nuevas superficies externamente a través de la fibrilación e internamente a través de la deslaminación de la pared de la fibra.
- Las fibras se deforman, originando cambios en su forma geométrica y la fibrilar. Alineamiento a lo largo de su longitud. En general, las fibras se aplanan o colapsan. Se inducen o enderezan los cambios de fibra y los pliegues.
- Las fibras se rompen, lo que resulta en cambios en la distribución de la longitud y una disminución en longitud media de la fibra. Una pequeña cantidad de material de pared de fibra también se disuelve.

Los cambios antes mencionados ocurren simultáneamente y son mayormente irreversibles. El alcance de los cambios depende de la morfología de las fibras, la temperatura, el entorno químico y las condiciones de tratamiento; las condiciones dependen del diseño del equipo y sus variables operativas, como la consistencia, la intensidad y la cantidad de tratamiento. Cada pulpa responde de manera diferente a un conjunto dado de condiciones y no todas las fibras dentro de ella reciben el mismo tratamiento (Lumaine citado por Bajpai, 2010).

### **2.3. Nanocelulosa**

La nanocelulosa (NC) es la definición general que se le otorga a una estructura modificada proveniente de la celulosa, la cual es reconocida como el biopolímero renovable más abundante en la tierra, sus propiedades de degradabilidad y nula toxicidad, la convierten en un material con múltiples usos y aplicaciones. La celulosa, existe como uno de los componentes principales de las plantas, siendo parte también de las algas y algunos animales marinos (Castro & Delgado, 2016; Pulido *et al.*, 2016). Al escoger la fuente de obtención de la celulosa, para su posterior conversión en NC, se prefiere las fibras lignocelulósicas ya que estas se componen principalmente por celulosa y hemicelulosa con un valor de 60 a 80 por

ciento, lignina entre 5 a 20 por ciento y 5 por ciento de pectina, agua, ceras, cutina y otros componentes menores (Camacho, 2013). Para poder llegar hasta las cadenas de celulosa, las fibras lignocelulósicas deben ser separadas pasando de microfibrillas a microfibrillas para luego ser separada de la hemicelulosa y lignina, quedando solo la celulosa como componente de la NC (Figura 1).

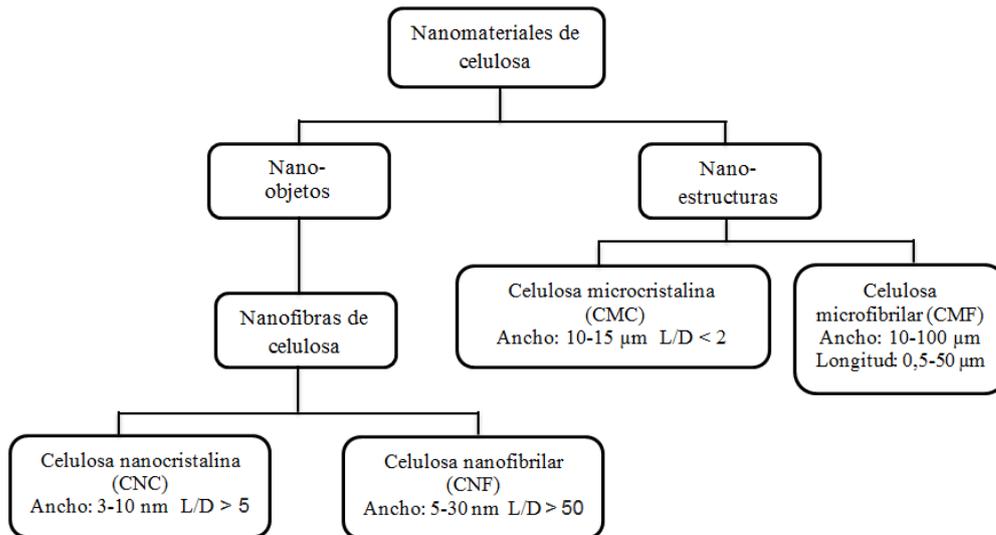


**Figura 1:** Esquema de fibrilar elemental a celulosa.

**Fuente:** Area (2019)

Como denominación, se refiere a la NC como aquel cristal o fibra de celulosa que posee una dimensión dentro del rango del tamaño nanométrico, generalmente estas fibras poseen diámetros de alrededor de 100 nm y varios micrómetros de longitud (Muñoz, 2018; Phantong *et al.*, 2018).

Debido a la variedad de terminología aparecida las últimas décadas, Kargarzadeh *et al.* (2017) propone estandarizar los términos y las definiciones relacionados con los nanomateriales de celulosa. Es así que, Mariano *et al.* (2014) sintetiza lo propuesto por TAPPI WI 3021 en la figura 2.



**Figura 2:** Términos estándar propuestos para los nanomateriales.

**Fuente:** Adaptado de Mariano *et. al.* 2014

Sobre esta clasificación, Osong *et al.* (2015), complementa que la nanocelulosa se puede clasificar en nanofibras de celulosa y nanoestructuras de celulosa. Las nanofibras de celulosa se subdividen en celulosa nanocrystalina (CNC), también llamada nanocristales de celulosa o nanodispersadores de celulosa; y celulosa nanofibrilar (CNF) o nanofibrilla de celulosa, siendo esta última la utilizada en la presente investigación. Asimismo, los materiales nanoestructurados de celulosa se subdividen en celulosa microcrystalina (CMC) o microcristales de celulosa; y celulosa microfibrilar (CMF) o también llamada microfibras de celulosa.

### 2.3.1. Formas de obtención de nanocelulosa

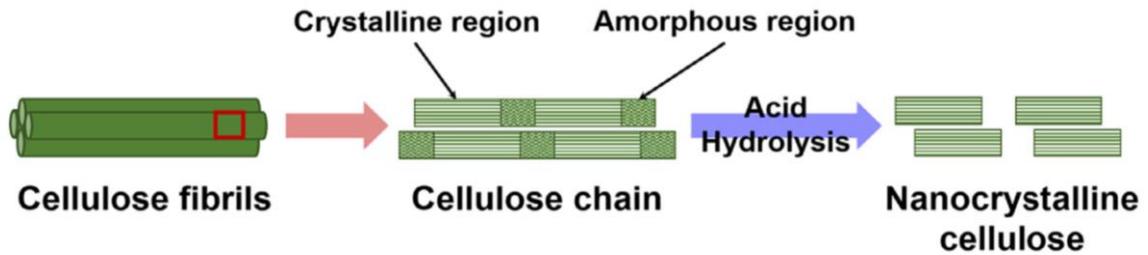
La obtención de la nanocelulosa, partiendo de materiales celulósicos, se desarrolla a través de varias técnicas de extracción dando como resultado diferencias en los tipos y las propiedades de la nanocelulosa (Peng *et al.*, 2011). La extracción de nanocelulosa es característica porque la principal operación es de tipo mecánica, pero complementándose con otras etapas que implican operaciones químicas y/o mecánicas. Estos pretratamientos incluyen una purificación y homogenización del material, esta etapa dependerá principalmente de la fuente de celulosa que se trabaja, los métodos pueden ser químico como la hidrólisis ácida, hidrólisis básica, o una hidrólisis combinada, tratamientos con solventes

orgánicos o por tratamiento iónico. La segunda etapa será un tratamiento mecánico, físico o también químico, se conocen principalmente los métodos del refinado, homogenización, microfluidización, molienda en equipos como grinder, criotrituración, sonicación, técnica de vapor explosión (Moon *et al.*, 2011; Giri & Adhikari, 2013; Christoph & Muñoz, 2015; Kim *et al.*, 2015).

Los pretratamientos y tratamientos deben ser elegidos según la fuente de celulosa a extraer y el tipo de nanocelulosa que se desea obtener, ya que la intensidad y el tipo pretratamiento junto con los procesos mecánicos, darán origen a la CNF y las CNC. Ambas son consideradas nanopartículas de celulosa, pero con características morfológicas y químicas diferentes, es decir con diferencia en sus dimensiones y en el porcentaje de cristalinidad. Las CNF albergan tanto celulosa cristalina como amorfa con tamaños en el orden micrométrico mientras que la CNC posee un porcentaje de 90 por ciento de celulosa cristalina y se encuentra en dimensiones nanométricas (Meng *et al.*, 2019; Andrade & Pereira, 2019).

#### **a. Celulosa nanocristalina (CNC)**

La CNC, son aquellas regiones cristalinas dentro de las nanofibrillas elementales de celulosa, con una composición química del 100 por ciento de celulosa con una cristalinidad alta alrededor de 54 a 88 por ciento. Su tamaño puede variar entre diámetros desde 2 a 20 nm y longitudes entre 100 y 600 nm. Además, tienen forma cilíndrica alargada y con una flexibilidad limitada en relación a la CNF, debido al hecho de no tener regiones amorfas. Se extrae de fibras celulósicas principalmente mediante procesos de desestructuración inducidas por ácido, durante la cual la hidrólisis ácida heterogénea (figura 3) implica la difusión de moléculas de ácido en las fibras de celulosa, seguida de la escisión de los enlaces glucosídicos (Andrade *et al.*, 2011; Habibi *et al.*, 2014; Damásio, 2015; Tayeb *et al.*, 2018; Phanthong *et al.*, 2018).

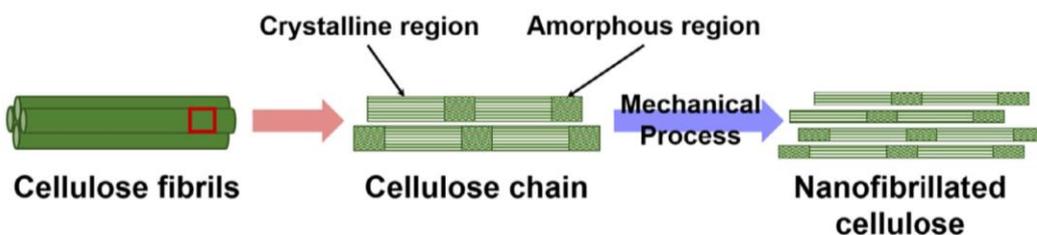


**Figura 3:** Extracción de CNC a partir de fibras de celulosa.

**Fuente:** Phanthong *et al.*, 2018

### b. Celulosa nanofibrilar (CNF)

Las CNF son nanofibras derivadas biológicamente de fibrillas, con una red interconectada y construidas a partir de dominios cristalinos y alternos de la celulosa, alcanzan diámetros de 10 a 60 nm y 500–2000 nm de longitud. Entre sus principales ventajas destacan la baja densidad, capacidad de renovación, altas propiedades específicas, biodegradabilidad, propiedades de barrera al gas, además puede extraerse de diversos recursos naturales, se debe considerar que su temperatura de procesamiento se limita aproximadamente a 200 °C, más allá de eso se degrada (Motaung, 2018; Kargarzadeh *et al.*, 2018). Una técnica de producción que se ha utilizado con frecuencia es la pre oxidación utilizando (2,2,6,6, tetrametilpiperidin-1-il) oxidanilo, abreviada como TEMPO; el papel principal del pretratamiento es alterar la estructura tensada de la biomasa lignocelulósica mediante la eliminación parcial o total de la lignina y la hemicelulosa, para reducir los ciclos de molienda antes de aplicar la vigorosa fibrilación mecánica (figura 4) mediante microfluidización u homogeneización (Tayeb *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2017)



**Figura 4:** Extracción de CNF a partir de fibras de celulosa.

**Fuente:** Phanthong *et al.*, 2018

## **2.4. Celulosa nanofibrilar (CNF) como refuerzo del papel**

La CNF ofrece diversas propiedades, esto abre un abanico de aplicaciones y funciones, ya que según el tipo de partícula y la compatibilidad que puede tener con otros materiales como polímeros, proteínas o células vivas, se forman los materiales nanocompuestos. El uso de CNF como aditivo de refuerzo para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del papel ha despertado un gran interés a la industria papelera con un potencial prometedor en el campo de la tecnología y el embalaje del papel en un futuro próximo. Estas ventajas se deben a la gran área de superficie específica y la alta relación de aspecto, confiere a las CNF una fuerte afinidad con la pulpa celulósica, en conjunto con su capacidad para formar una red 3D, lo cual constituye un abanico de beneficios para mejorar de la resistencia del papel. De igual forma, se ha demostrado que la distribución de CNF en el papel aumenta de manera sustancial las propiedades mecánicas del papel, ya que al tener una superficie específica muy superior a la de las fibras, promueven una mayor formación de puentes de hidrógeno en el papel, lo que se traduce en una mejor transmisión de los esfuerzos mecánicos y físicos. Se ha reportado que la CNF en el papel ocasiona aumentos en la densidad e incrementa la permeabilidad de Gurley cuyos valores fluctúan entre 200 a 300 s, además reduce la porosidad del papel llegando hasta porcentajes de 50 (González *et al.*, 2013; Kalia *et al.*, 2014; Delgado, 2015).

En cuanto a las propiedades mecánicas de estos papeles, aumenta el módulo de Young llegando hasta 5 GPa, de igual forma reduce el índice de rasgado hasta 6 mN·m<sup>2</sup>/g, pero logrando incrementos en la longitud de ruptura de hasta 6000 m. Su utilización en los procesos de producción de papel puede tener varios objetivos, los cuales están en función del tipo de CNF, el modo de aplicación que se seleccione (en masa y/o en superficie) y mediante la adición de porcentajes discretos de CNF que no suelen superar el 6 o el 9 por ciento (González *et al.*, 2013; Kalia *et al.*, 2014; Delgado, 2015).

## **2.5. Otras aplicaciones**

Al poseer propiedades especiales como una alta resistencia mecánica, propiedades térmicas y transparencia, su aplicación ha incitado un gran interés académico y empresarial. Al derivar de materiales abundantes como fibras naturales, renovables y biodegradables, posee

una ventaja competitiva en relación a los materiales fósiles e industrializados (Damásio, 2015; Abitbol *et al.*, 2016; Phantong, 2018).

Asimismo, los nanocompuestos de celulosa comprenden desde aplicaciones a granel como modificadores reológicos, refuerzos compuestos o aditivos para papel, hasta aplicaciones de alta gama como ingeniería de tejidos, administración de medicamentos y materiales funcionales. Asimismo, otros usos como papeles ópticamente transparentes para pantallas electrónicas, como soporte para crear materiales híbridos de ADN, aerogeles, nanocompuestos de almidón, usos en ingeniería, medicina y en general, su uso para mejorar el acoplamiento entre matriz y fibra (Eichhorn *et al.*, 2010; Österberg & Cranston, 2014; Kalia *et al.*, 2014).

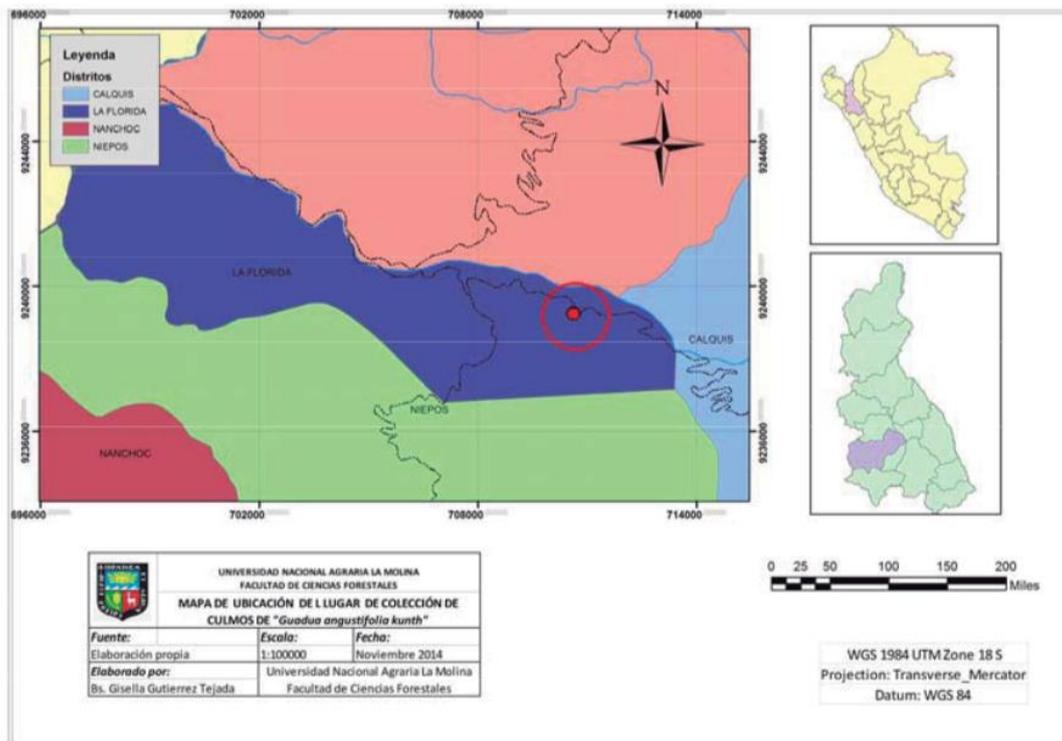
### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Área de estudio**

La investigación fue desarrollada en el Laboratorio de Pulpa y Papel del Departamento Académico de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

#### **3.2. Materiales, insumos y equipos**

Las cañas de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) provienen del distrito de La Florida, provincia de San Miguel, región de Cajamarca (figura 5). En tanto que, la fibra reciclada DKL fue obtenida de la empresa “Papelera del Sur S.A.C”, perteneciente al consorcio Cartones América, ubicado en la provincia de Chincha, región de Ica.



**Figura 5:** Lugares de colecta para *Guadua angustifolia* Kunth.

**Fuente:** Gutiérrez (2015)

### 3.2.1. Reactivos

- Hidróxido de sodio (NaOH) al 16 % y 22 % de álcali activo.
- Antraquinona (AQ) al 0.1 %.
- 300 mL de dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) al 2.2 %.
- 300 mL hipoclorito de sodio (NaClO) al 7 %.
- 200 mL peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 30 %.
- Bromuro de sodio (NaBr) - 0,1g por gramo de fibra.
- 2,2,6,6 - tetrametilpiperidina-N-oxilo (TEMPO) de SIGMA-ALDRICH - 0,016g por gramo de fibra.
- Agua destilada

### 3.2.2. Materiales

- 2 recipientes de plástico de 5 l
- 2 recipientes de plástico de 10 l
- Probetas de vidrio de 50 mL, 100 mL, 500 ml y 1000 mL
- 1 vaso precipitado de 100 mL
- 4 bolsas de tela
- 20 bolsas sellantes
- 1 par de guantes de hule
- 1 millar de hojas bulky
- 2 pliegos de papel secante
- 2 pliegos de papel filtro
- Micropipetas con rango de volumen de 0.1 a 100  $\mu$ l
- 10 tiras de papel para pruebas de pH

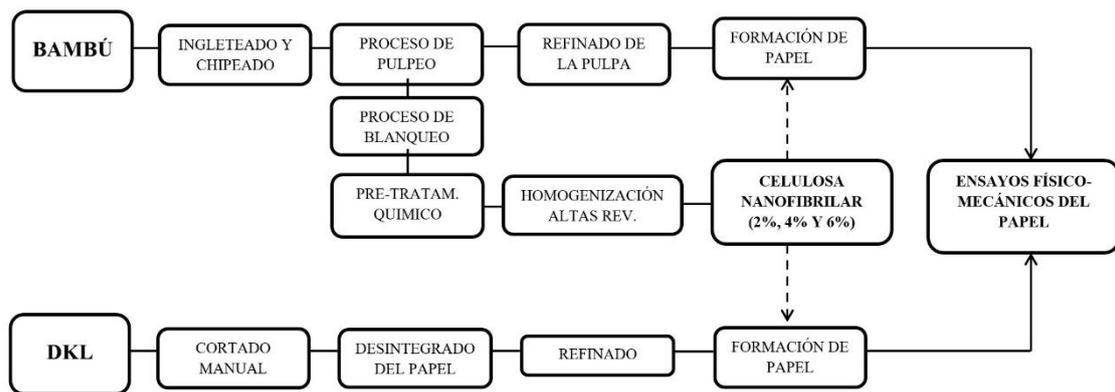
### 3.2.3. Equipos

- Sierra de disco portátil (ingleteadora)
- Balanza analítica Miray de 0,01 g de precisión
- Balanza electrónica Camry de 1 g de precisión
- Estufa de convección forzada BINDER con capacidad hasta 300 °C
- Centrífuga de mesa digital PrO-Analytical para tubos de 50 mL
- Desintegrador de fibras, capacidad 2 L
- Refinador de pulpa PFI, sistema de rotación
- Clasificador de fibras *Bauer McNett*, entre 14 a 200 mesh.

- Digestor rotatorio, capacidad 15 l y accesorios
- Baño termostático DLAB DWB20-P, temperatura máxima de 100 °C
- Agitador Vortex VELP, máximo de 6000 rpm
- Agitador magnético con calefacción M6 CAT
- Homogeneizador de altas revoluciones JP Selecta
- Equipo *Schoppler Riegler Lorentzen & Wettre*
- Formadora de hojas, con anillos de secado y discos metálicos
- Prensa hidráulica WEAP, carga máxima 20 kg/cm<sup>2</sup>
- Micrómetro Lorentzen & Wettre, capacidad de 1 µm
- Tensiómetro y accesorios Lorentzen & Wettre, capacidad de carga hasta 30 kg
- Plegómetro Tinius Olsen
- Rasgómetro y accesorios Lorentzen & Wettre, capacidad de 100 g-cm
- Espectómetro UV Thermo en espectro visible (400-700 nm) y UV (300-400 nm)
- Porosímetro Lorentzen & Wettre

### **3.3. Métodos**

La figura 6 muestra los procedimientos principales de la investigación partiendo de las materias primas utilizadas. El bambú fue utilizado en la elaboración del papel y la obtención de la CNF, en tanto que, el DKL fue utilizado solo para la elaboración del papel.



**Figura 6:** Flujograma del presente estudio

A continuación, se describen los principales procedimientos realizados:

### 3.3.1. Recolección de materia prima

Se colectaron tres cañas de bambú, estas fueron seleccionadas por su rectitud, madurez y altura. Asimismo, todas tenían un buen estado sanitario y presencia de líquenes, lo cual según Añazco (2013) las cañas de bambú están aptas para el corte. Estas fueron seccionadas en tres partes: “A” (basal), “B” (media) y “C” (apical), las dos primeras secciones fueron cortadas cada 6 m y la tercera sección se quedó con el largo restante, las dimensiones aproximadas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1:** Diámetros y alturas de las cañas de bambú.

Cañas	Sección	Espesor (cm)	Diámetro promedio (cm)	Altura (m)
1	A	2,30	10,50	14,5
	B	1,25	6,40	
	C	0,90	2,42	
2	A	1,50	11,46	18
	B	0,90	9,55	
	C	0,60	7,56	
3	A	2,50	11,46	16,7
	B	1,75	7,00	
	C	1,00	4,77	

A: sección superior, B: sección media y C: sección inferior del bambú.

Asimismo, las cañas acumularon un peso de 134,9 kg, separadas por secciones fueron 86,5, 38,15 y 10,25 kg de bambú correspondientes a áreas basales, medias y apicales.

### 3.3.2. Preparación de la materia prima

Las cañas de bambú fueron cortadas en secciones de 3 cm de longitud, utilizando una sierra de disco (ingleteadora) para posteriormente ser astilladas con formón y martillo, de forma paralela a la fibra, con el fin de evitar el daño a las fibras. En cuanto a las láminas de DKL, estas fueron rasgadas manualmente obteniendo piezas de 2 cm x 2 cm de dimensión aproximadamente. La materia prima preparada se muestra en la figura 7.



**Figura 7:** Preparación de la materia prima de bambú (izquierda) y papel DKL (derecha).

### 3.3.3. Obtención de pulpa de bambú

Se realizaron dos procesos de pulpeo alcalino, con un pH mayor a 10, y aditivo de antraquinona (AQ) para catalizar la reacción. Las condiciones de trabajo fueron presión en un rango de 6 a 10 kg/cm<sup>2</sup>, temperaturas entre 160 a 185 °C, y un intervalo de tiempo de 2 a 4 horas.

Los pulpeos se diferenciaron en la cantidad de álcali activo utilizado y en el factor H. El primer pulpeo fue realizado para obtener fibra de bambú que se utilizó en la elaboración de papel de bambú y para el papel mezcla de bambú y DKL, sus condiciones se muestran en la tabla 2:

**Tabla 2:** Condiciones del primer pulpeo de *Guadua angustifolia*.

<b>Condición</b>	<b>Valor</b>
Álcali activo NaOH (%)	16
Masa seca (g)	150
Relación sólido/líquido	1/4
Antraquinona (%)	0,1
Factor H	1000

Paralelamente, se realizó un segundo pulpeo el cual fue utilizado en la obtención de CNF de bambú, por lo cual se varió las condiciones de la siguiente forma:

**Tabla 3:** Condiciones del segundo pulpeo de *Guadua angustifolia*.

<b>Condición</b>	<b>Valor</b>
Álcali activo NaOH (%)	22
Masa seca (g)	150
Relación sólido/líquido	1/4
Antraquinona (%)	0,1
Factor H	1400

En ambos pulpeos se determinó el índice de Kappa según TAPPI T 236 cm-85, para calcular la lignina residual de la pulpa.

#### **3.3.4. Desintegrado de DKL**

Previamente, el papel DKL fue desintegrado para poder obtener “pulpa” de DKL. Luego se determinó las diferentes longitudes de las fibras siguiendo la normativa TAPPI 233 cm-95. De igual forma, se determinó el número Kappa según la norma TAPPI T 236 cm-85.

### 3.3.5. Refinado de las fibras

Esta etapa fue realizada con el fin de lograr la fibrilación de las fibras para mejorar su capacidad de enlace con otros componentes. Se utilizó un refinador PFI (figura 8) siguiendo la norma TAPPI T 248. Luego se procedió a realizar un control del refinado utilizando el método Schopper Riegler (SR°) según la norma SCAN-C19:65.



**Figura 8:** Refinador PFI.

### 3.3.6. Elaboración de celulosa nanofibrilar de bambú:

#### a. Blanqueamiento de la pulpa de bambú

Se realizó una secuencia de blanqueo ECF. La cual consideró las siguientes etapas: una primera etapa (D) con dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), la siguiente etapa (E) consiste en la extracción alcalina usando hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ). En la tercera etapa (H), se consideró como blanqueador al hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ). Finalmente, la última etapa (P) fue realizada con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). En la tabla 4 se muestra las variables a considerar en esta etapa.

**Tabla 4:** Secuencia de blanqueo.

	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>Reactivo</b>	ClO <sub>2</sub>	NaOH 40%	NaClO	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
<b># Repeticiones</b>	2	1	2	2
<b>Distribución del blanqueador</b>	70 %	5 %	20 %	2 %
<b>Adicionales</b>	10 gotas Ac. acético	-	2 mL NaOH 40 %	3 mL NaOH 40 %
<b>Consistencia (%)</b>	2 %	2 %	5 %	5 %
<b>Temperatura (°C)</b>	70	70	45	70
<b>Tiempo (min.)</b>	60	120	150	90

La consistencia se calculó con base a la cantidad de agua por masa seca de pulpa que ingresaba a cada etapa y varió en cada una de estas. Asimismo, en el intervalo de cada etapa se realizó un lavado de la pulpa para eliminar el exceso de reactivos.

#### **b. Pretratamiento químico**

El pretratamiento químico de la pulpa para CNF consideró como base los estudios previos realizados por Saito *et al.* (2007) y Delgado (2015a). Se utilizó el segundo pulpeo de *Guadua angustifolia* Kunth y se consideraron las condiciones que se muestran en la tabla 5 para la posterior elaboración de la CNF.

**Tabla 5:** Condiciones previas de la pulpa de *Guadua angustifolia* para elaborar CNF.

<b>CH (%)</b>	84,21 %
<b>Consistencia (%)</b>	1 %
<b>Reacción de oxidación</b>	TEMPO/NaBr/NaClO
<b>pH</b>	10-11
<b>Temperatura (T°)</b>	Ambiente

**Procedimiento:** Se pesaron 15 g de masa seca de pulpa de bambú blanqueada, estas fueron dispersadas en agua destilada en presencia de los catalizadores TEMPO (Ficha técnica: anexo 1) y NaBr. La suspensión fue agitada durante 15 minutos en un agitador magnético a 500 RPM, para asegurar la buena dispersión de todos los componentes.

La oxidación inició con la adición de una solución al 15 % (v/v) de NaClO gota a gota a la suspensión. El pH se mantuvo constante en 10 mediante la adición continua de una solución de 0.5 M NaOH, luego de 2 horas y 30 minutos aproximadamente. Obteniendo una solución acuosa de aspecto blanquecino como muestra la figura 9.



**Figura 9:** Pulpa blanqueada luego del pre tratamiento químico.

### c. Tratamiento mecánico

Para la obtención de la CNF, se realizó un tratamiento final de tipo mecánico el cual fue realizado con un homogenizador JP selecta de altas revoluciones. Previo al tratamiento, la solución obtenida en el procedimiento anterior fue centrifugada a 6000 RPM con intervalos de 5 min, en tubos de plástico de 50 mL y conteniendo aproximadamente 0,5 g de CNF parcial, esto con el fin de eliminar el exceso de agua. Posterior a esto, se continuó con el homogenizado a 25000 RPM (figura 10) durante 20 min aproximadamente hasta obtener la CNF con un aspecto de gel, esto fue verificado visualmente.



**Figura 10:** Homogenizado de CNF a altas revoluciones.

### **3.3.7. Adición de celulosa nanofibrilar en masa**

Para la formación del papel se utilizaron tres porcentajes 2, 4, y 6 por ciento de celulosa nanofibrilar (CNF) como aditivo para cada tipo de fibra. Se trabajó con muestras de 30 g de masa seca de pulpa con tres repeticiones por grupo, tal como se presenta en la tabla 6:

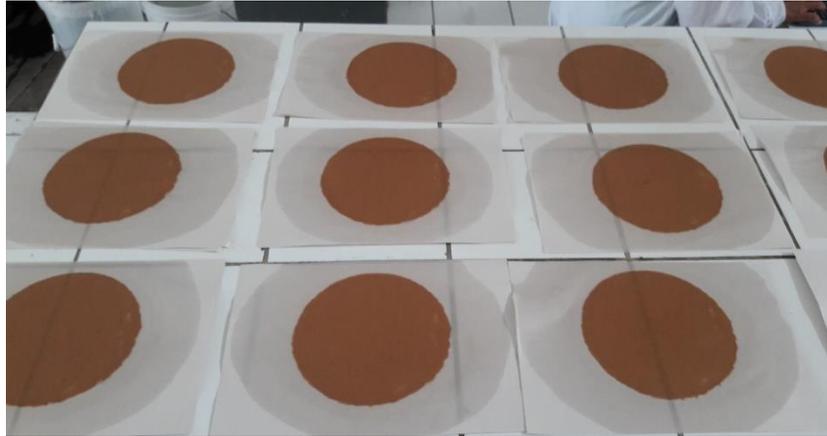
**Tabla 6:** Combinaciones de fibra en la elaboración del papel con aditivo de CNF.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Masa seca (g)</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Masa total (g)</b>	<b>% CNF en papel</b>
Bambú	30	3	90	0
	30	3	90	2
	30	3	90	4
	30	3	90	6
DKL	30	3	90	0
	30	3	90	2
	30	3	90	4
	30	3	90	6
Mezcla	30	3	90	0
	30	3	90	2
	30	3	90	4
	30	3	90	6

### **3.3.8. Formación de hojas de papel**

Previo a la elaboración del papel con CNF, cada combinación fue llevada al refinador a 3000 RPM durante 1 hora y 30 min donde se agregó la CNF, sílice coloidal (0,8 % de masa seca) y almidón catiónico (0,5 % de masa seca) de forma manual. Estos últimos funcionan como agentes de retención de humedad en el papel.

La formación de hojas para ensayos físicos se ejecutó conforme a la norma TAPPI 205 sp-95 con cada una de las pulpas obtenidas. Las hojas elaboradas para los tres tipos de papeles son de la forma que se muestran en la figura 11.



**Figura 11:** Formación de papel de DKL.

### 3.3.9. Evaluación del papel

Para la evaluación del papel, se realizaron los siguientes ensayos físicos y mecánicos de acuerdo a las normas TAPPI, según se muestra en la tabla 7:

**Tabla 7:** Ensayos del papel.

<b>ENSAYOS FÍSICOS</b>	<b>NORMA</b>
Humedad	TAPPI T-412
Gramaje	TAPPI T-410
Espesor y densidad	TAPPI T-411
Determinación de la blancura	TAPPI T-452
Opacidad	TAPPI T-425
Permeabilidad Gurley	TAPPI T-460
<b>ENSAYOS MECÁNICOS</b>	
Resistencia a la tensión	TAPPI T-404
Resistencia al rasgado	TAPPI T-414
Resistencia al plegado	TAPPI T-511

### 3.4. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La apariencia externa del papel obtenido fue analizada mediante imágenes con la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (Scannig Electron Microscopy por sus siglas en inglés SEM), en el laboratorio de Biotecnología de la UNALM.

### 3.5. Diseño experimental

La investigación planteó las siguientes hipótesis:

**H:** La celulosa nanofibrilar de *Guadua angustifolia* Kunth como aditivo influirá en las propiedades físicas y mecánicas del papel elaborado con pulpa de *Guadua angustifolia* Kunth y fibra reciclada Double Kraft Liner (DKL)

**Ho:** La celulosa nanofibrilar de *Guadua angustifolia* Kunth como aditivo no influirá en las propiedades físicas y mecánicas del papel elaborado con pulpa de *Guadua angustifolia* Kunth y fibra reciclada Double Kraft Liner (DKL)

El diseño de la investigación estableció un arreglo factorial de dos variables dependientes: el tipo de fibra para papel (bambú, DKL, mezcla) y el porcentaje de aditivo de celulosa nanofibrilar (2%, 4% y 6%). La combinación de estas variables logró 9 tratamientos, los cuales contarán con 3 repeticiones cada uno (3x3x3). Las variables independientes serán: permeabilidad Gurley, resistencia a la tensión, resistencia a la tracción, resistencia al rasgado y resistencia al plegado.

El modelo de diseño factorial será el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

$Y_i$ : Valor observado de la variable dependiente en estudio para la unidad experimental del bloque  $k$  sujeto al tratamiento  $j$ .

$\mu$ : media general

$\alpha_i$ : efecto  $i$ -ésimo tipo de fibra

$\beta_j$ : efecto  $j$ -ésimo porcentaje de celulosa nanofibrilar.

$(\alpha\beta)_{ij}$ : efecto de la interacción del tipo de fibra y el porcentaje de celulosa nanofibrilar

$\epsilon_{ijk}$ : efecto del error aleatorio del tipo de fibra y el porcentaje de celulosa nanofibrilar

En la tabla 8 se muestra el diseño experimental para la elaboración del papel con aditivos de CNF, para cada unidad experimental se efectuó ensayos de propiedades físicas y mecánicas de los papeles.

**Tabla 8:** Diseño experimental de las combinaciones de fibra en la elaboración del papel con aditivo de CNF.

Variables		Características evaluadas				
Tipo de fibra	% de aditivo de CNF	Permeabilidad Gurley	Resistencia a la tensión	Resistencia a la tracción	Resistencia al rasgado	Resistencia al plegado
Bambú	0	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X
	4	X	X	X	X	X
	6	X	X	X	X	X
DKL	0	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X
	4	X	X	X	X	X
	6	X	X	X	X	X
Mezcla bambú/DKL (50/50)	0	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X
	4	X	X	X	X	X
	6	X	X	X	X	X

### **3.6. Análisis de los datos**

Con los datos obtenidos se aplicó el análisis de variancia (ANOVA) para saber si los resultados están influenciados por los tratamientos; se considerará un intervalo de confianza del 95 % y un margen de error de 0,05 %. Para la comparación de medias se aplicaron pruebas no paramétricas de comparaciones múltiples, Kruskal-Wallis y Mediana. Asimismo, la selección del mejor tratamiento fue realizado con el mismo análisis estadístico mencionado.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Obtención de pulpa de bambú

En la elaboración del papel de bambú y el papel mezcla se utilizaron 810 g (masa seca) de pulpa de bambú. Para la obtención de la cantidad mencionada se realizaron cinco procesos de pulpeo del primer tipo, mencionado en la metodología. Asimismo, se llevó a cabo el control del proceso de pulpeo mediante el índice de kappa. En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos luego de este procedimiento.

**Tabla 9:** Pulpeo de *Guadua angustifolia* para elaboración del papel.

<b>N° pulpeo</b>	<b>Incocidos (%)</b>	<b>Rendimiento neto (%)</b>	<b>Índice de Kappa</b>
1	4,19	46,31	42,62
2	4,63	48,19	43,01
3	1,45	42,85	39,71
4	1,88	46,57	40,65
5	5,87	47,30	44,60
<b>PROM:</b>	<b>3,60</b>	<b>46,26</b>	<b>42,11</b>

El rendimiento neto promedio del pulpeo es de 46,26 por ciento, esto concuerda con lo mencionado por Sixta (2006), quien afirma que en este proceso el rendimiento total de fibra varía de 45 a 55 por ciento, dependiendo de la fuente de madera y el proceso de fabricación de pulpa aplicado. Asimismo, es necesario tomar en cuenta que a pesar de que el pulpeo químico posee una baja tasa de conversión de la materia prima las pulpas producidas químicamente tienen una alta resistencia empleándose para diferentes tipos de papeles sobre todo aquellos papeles finos del tipo impresión-escritura (González & Garay citado por Ruiz, 2004).

En cuanto al índice de kappa se reporta un valor de 42,11, a pesar de ser un valor elevado al compararlo con lo obtenido por Borges *et al.* (2018), quienes obtienen un valor mayor de índice kappa de 67,8 en pulpa de la especie de *Bambusa vulgaris*, asegurando que a pesar del alto nivel de lignina residual indicado por el índice es posible elaborar papeles de calidad.

#### 4.2. Caracterización de fibras DKL

Las fibras de DKL fueron caracterizadas mediante el método de tamizado en húmedo (cuatro tamices) con el clasificador de fibras Bauer McNett. Los resultados obtenidos, de fracción en masa, de la clasificación de fibras se presenta en la tabla 10.

**Tabla 10:** Valores porcentuales de fracción de fibras de DKL obtenidas en el clasificador Bauer McNett.

<b>Mallas</b>	<b>Masa seca (g)</b>	<b>Abertura de malla (mm)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Malla + 16</b>	8,2692	> 1,190	82,692
<b>Malla -16/+30</b>	0,5187	0,595 <abertura <1,190	5,187
<b>Malla -30/+100</b>	0,7915	0,595 <abertura <0,149	7,915
<b>Malla -100/+200</b>	0,2195	0,149 <abertura <0,074	2,195
<b>Finos (-200)</b>	0,2010	< 0,074	2,011

En los resultados obtenidos se observa que el mayor porcentaje de fibra (82,692 %) se obtiene con la malla 16 que representa la fracción de fibras largas en el papel DKL. Lo mencionado acredita el uso de este tipo de papel, ya que como Aguilar (2004) menciona, utilizar papeles reciclados con altos porcentajes de fibra larga justifica su uso e influye en la mejora de sus propiedades, lo cual puede usarse de manera provechosa en la industria papelera. El valor ponderado de la fibra es de 2,5707 mm. Este valor es comparable con la investigación de Turrado *et al.* (2009) quienes presentan un valor de longitud promedio de 2,4380 mm para pulpa Kraft de pino; fibra que es comparable con las de DKL ya que este tipo de fibras secundarias provienen de residuos de cartón que no han tenido ningún uso, bajos niveles de impureza y alta calidad, lo cual permite ser considerado una fibra casi virgen.

### 4.3. Resultados del refinado

El nivel de refinado para los dos tipos de fibra antes de la elaboración del papel fue definido con una serie de ensayos con diversos niveles de refinado, esto se presenta en la tabla 11:

**Tabla 11:** Control del refinado sobre la pasta de los papeles obtenidos.

<b>Revoluciones (Rev.)</b>	<b>DKL</b>	<b>Bambú</b>
<b>2000</b>	22 °SR	31 °SR
<b>4000</b>	25 °SR	
<b>6000</b>	29 °SR	
<b>8000</b>	32 °SR	

En la tabla 10 se observan los valores de drenabilidad para las fibras de bambú y DKL. En el caso del papel DKL se determinó la intensidad del refinado al alcanzar un valor comercial del papel Kraft entre 30 a 50 °SR. En la tabla se observa un valor de drenabilidad de 32 °SR a un nivel de refinado de 8000 revoluciones. Además, es necesario considerar la procedencia del papel, ya que al ser un papel del tipo Kraft se utiliza como materia prima fibra de madera conífera la cual requiere mayor energía para alcanzar el valor de drenabilidad recomendado.

Asimismo, la anatomía del bambú trae como consecuencia un comportamiento diferente en la fibrilación, por lo cual, solo se necesitó 2000 revoluciones para alcanzar un valor de 31°SR. Con esto se pudo establecer el nivel de refinado para las fibras, considerando valores de drenabilidad similares en ambos tipos de fibra. De igual forma, investigaciones como la de Junior *et al.* (2013) revelan que pulpa de bambú sin refinar pueden alcanzar valores de drenabilidad entre 25 a 30 °SR, niveles altos comparados con el papel de DKL. Pero González *et al.* (2012) resalta la importancia del refinado afirmando que este proceso confiere a las fibras una mayor flexibilidad y un aumento de la superficie específica aumentando la capacidad de enlace de estas. Por lo cual resultó necesario realizar el refinado de la pulpa de bambú en un nivel mínimo de 2000 revoluciones para alcanzar el valor deseado y obtener un mayor nivel de resistencia para el papel durante su uso.

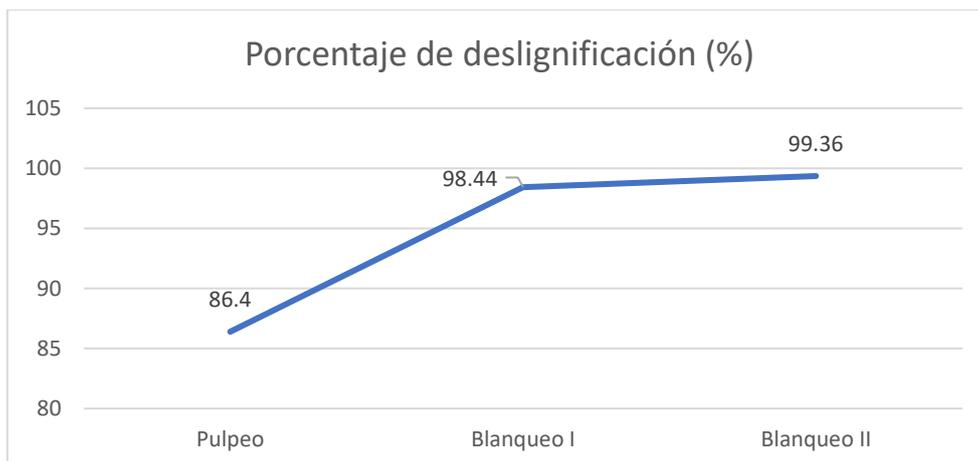
#### 4.4. Elaboración de CNF

Para la obtención de CNF, se realizaron previamente el pulpeo y blanqueo de la pulpa de bambú con la finalidad de eliminar el mayor contenido de hemicelulosas y lignina de las fibras. Los resultados se presentan en la tabla 12:

**Tabla 12:** Resultados del pulpeo y blanqueo de *Guadua angustifolia* Kunth.

	<b>Pulpeo</b>	<b>Blanqueo (Etapa intermedia)</b>	<b>Blanqueo (Etapa final)</b>
Rendimiento (%)	39,40	-	36,65
Índice de Kappa	23,13	2,7	1,19
Lignina residual (%)	3,40	0,39	0,16
Deslignificación (%)	86,4	98,44	99,36

El rendimiento fue calculado al finalizar cada proceso, el pulpeo obtuvo rendimiento de 39,40 por ciento esto comparado con la investigación de Rubio (2018) quien obtiene rendimientos promedios de 46,19 por ciento para el pulpeo de cañas de *Guadua angustifolia* Kunth procedentes de la Florida, misma locación que la presente investigación. En cuanto a la etapa de blanqueo, el rendimiento es similar al pulpeo, pero se observa la disminución del índice de Kappa esto implica la reducción de la lignina residual hasta 0,16 por ciento, y tal como lo mencionan Cuellar y Muñoz (2010), la remoción de la lignina permitirá la modificación de la superficie de las fibras predisponiéndolas para una mejor interacción con otras matrices. La cantidad de lignina residual de la pulpa fue disminuyendo conforme se realizaron los procesos culminando en un porcentaje de 0,16 por ciento en la etapa final del blanqueo de la pulpa. De igual forma en la figura 12 se presenta el aumento de la deslignificación del bambú a través de las etapas.



**Figura 12:** Evolución de la deslignificación de la *Guadua angustifolia* Kunth.

Según Hurtado (2017) la remoción de lignina de la fibra mejora las propiedades de adhesión cuando se pretende trabajar las fibras como refuerzo de un material compuesto, esto para el caso de la elaboración de CNF es importante, debido que la lignina debe eliminarse casi en su totalidad para darle paso a la celulosa y a su posterior conversión en CNF. Asimismo, el porcentaje de deslignificación de *Guadua angustifolia* Kunth obtenido por el autor mencionado fue un valor cercano al 100 por ciento esto se aproxima a la presente investigación con 99,36 por ciento de deslignificación.

La figura 13 muestra la pulpa antes de ingresar al proceso del blanqueamiento, tanto que la figura 14 presenta la pulpa obtenida luego de este proceso.

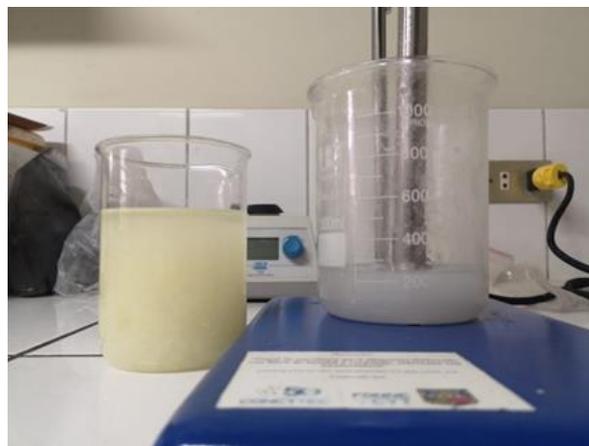


**Figura 13:** Pulpa de *Guadua angustifolia* sin blanquear.



**Figura 14:** Pulpa de *Guadua angustifolia* Kunth blanqueada.

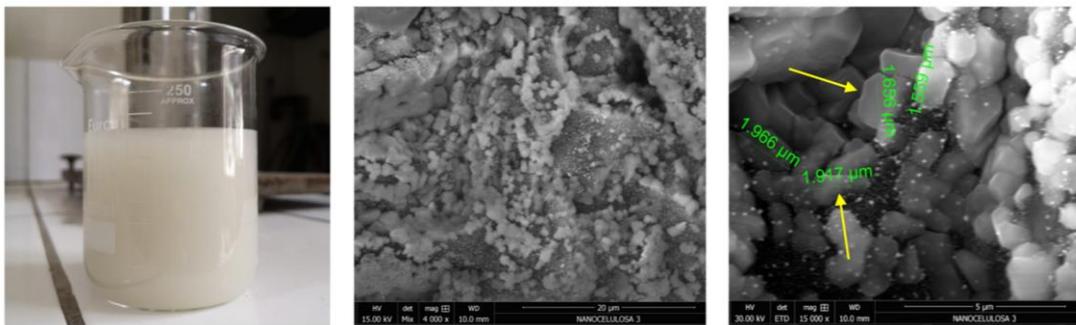
Siguiendo con el proceso de elaboración de CNF se realizó el pretratamiento químico mediante la reacción TEMPO/NaBr/NaClO; posterior a ello, se realizó la homogenización a 25000 RPM durante 20 minutos, hasta obtener un gel de aspecto blanquecino como muestra la figura 15.



**Figura 15:** De izquierda a derecha: cambio desde el pre tratamiento hasta el tratamiento mecánico de la CNF.

## 4.5. Caracterización de la CNF

La figura 16 muestra las CNF, observándose partículas entre 1,5 a 1,9  $\mu\text{m}$  de longitud, lo que coincide con los resultados de Saito *et al.* (2007) quien obtiene celulosa nanofibrilar con partículas con longitudes de 0,87  $\mu\text{m}$ , aunque entre 3-4 nm y menciona que son esas pequeñas dimensiones las convierte en una sustancia casi transparente y viscosa. Asimismo, Endes *et al.* (2016) afirma que la gran cantidad de grupos hidroxilos que se generan en la superficie de las CNF permiten que estas interactúen con otras matrices poliméricas mediante los enlaces hidrógeno y las convierten en candidatas ideales para los refuerzos de polímeros.

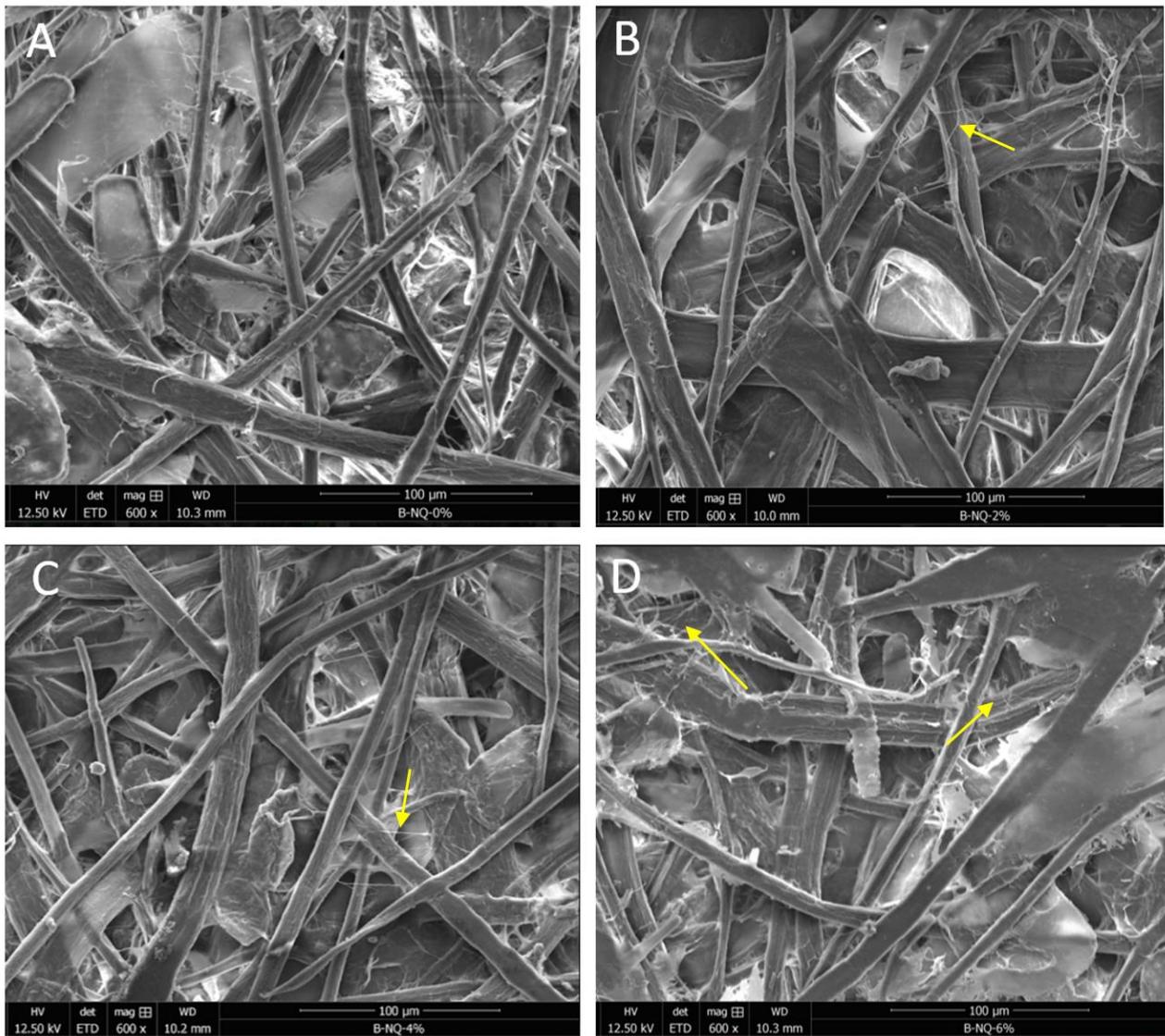


**Figura 16:** Apariencia final de la CNF (izquierda) y vista al microscopio (centro e izquierda). La flecha indica la partícula de CNF.

## 4.6. Microscopía electrónica de los papeles

### 4.6.1. Aplicación de CNF en papel de bambú

En la figura 17 se observa fibras de bambú con diferentes diámetros y como aumenta la red de CNF (Figura 17, imagen D) que se interconecta con las fibras. González *et al.* (2013) explican que el incremento de las propiedades mecánicas de los papeles con CNF se debe a la distribución de estas en el papel y debido a que tienen una superficie específica superior a las fibras se incrementa la formación de puentes de hidrógeno en el papel, esto significa mayores esfuerzos mecánicos y disminución en la porosidad.

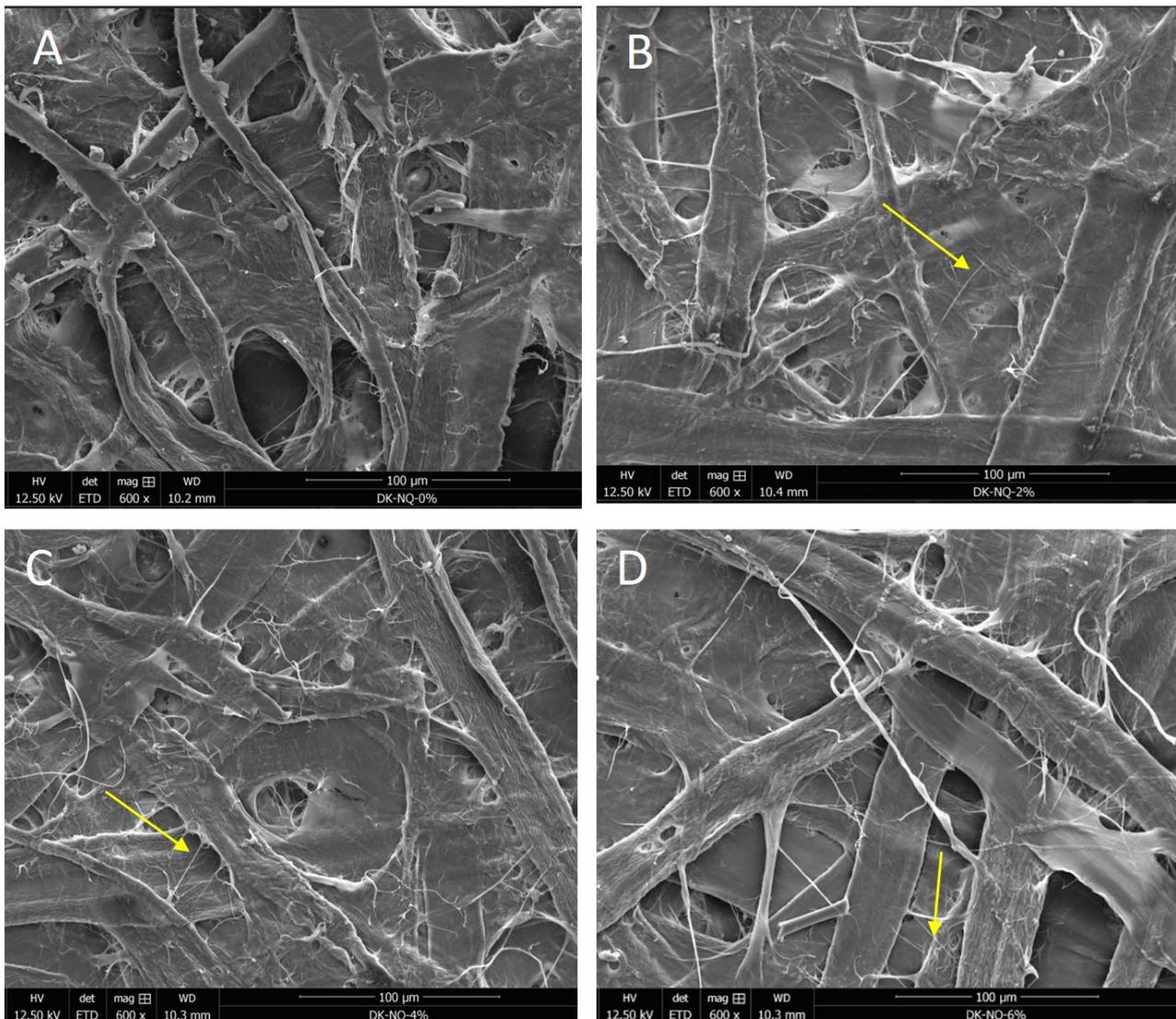


**Figura 17:** Papel de bambú con diferentes concentraciones de CNF al (A) 0 %; (B) 2 %; (C) 4 % y (D) 6 % de concentración. Las flechas indican la CNF interconectando las fibras

#### 4.6.2. Aplicación de CNF en papel DKL

En la figura 18, se observa las fibras del papel DKL, las cuales presentan mayor presencia de finos y residuos debido a la procedencia reciclada del papel. Además, las fibras recicladas cuentan un mayor nivel de refinado, lo cual según Ioelovich & Figovsky (2010), implica un cambio en su morfología, así como una promoción de su división longitudinal y predisposición a formar enlaces con otros elementos. Asimismo, estas fibras presentan una mayor degradación, según Potulski *et al.* (2018) cuando las fibras no están completas y

evidencian daños se reducen su resistencia física y mecánica, lo cual es contrarrestado con el aumento de enlaces con la red de celulosa nanofibrilar que conecta las fibras.

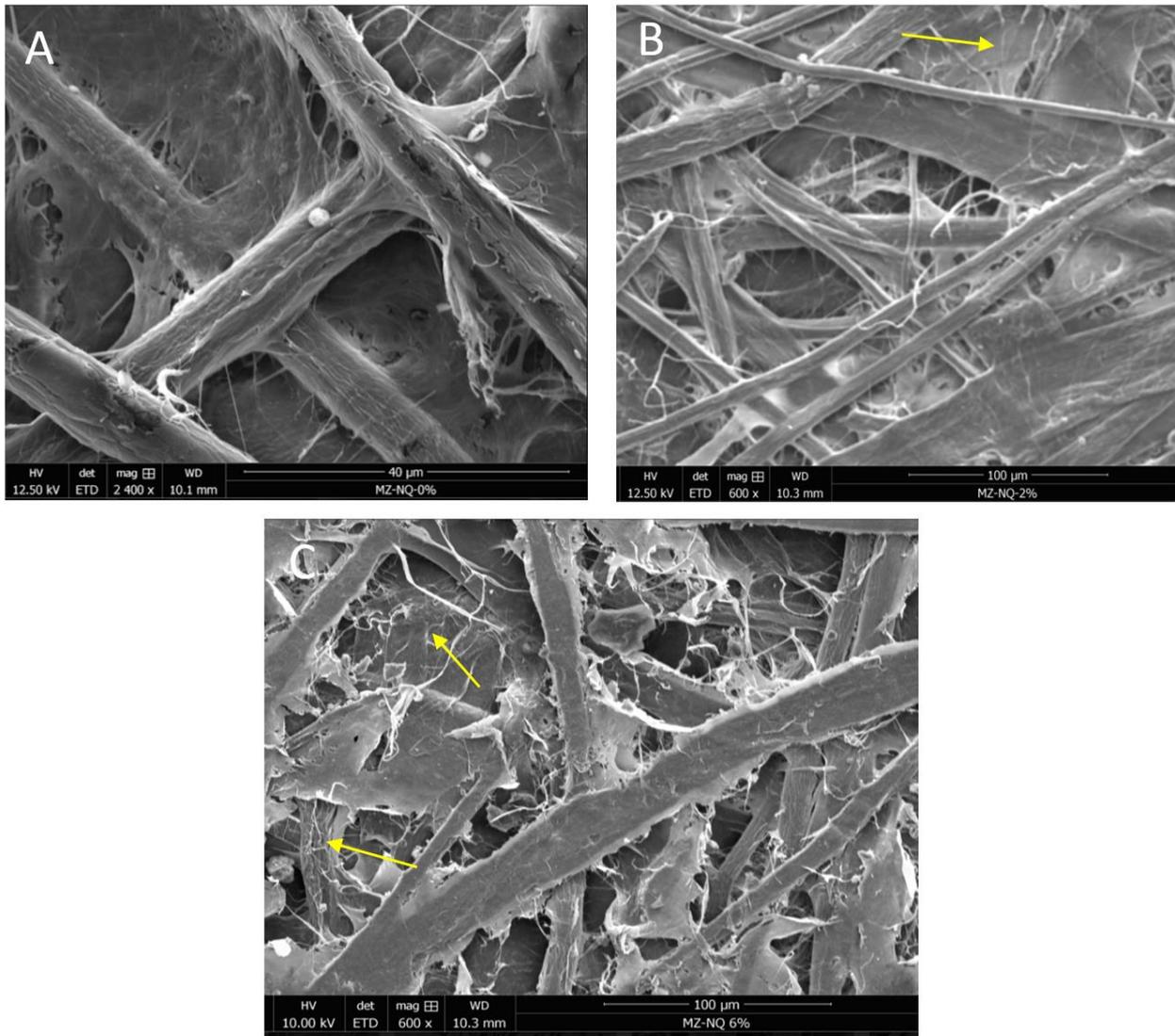


**Figura 18:** Papel DKL con diferentes concentraciones de CNF al (A) 0 %; (B) 2 %; (C) 4 % y (D) 6 % de concentración. Las flechas indican la CNF interconectando las fibras.

#### 4.6.3. Aplicación de CNF en papel mezcla

El papel mezcla está formado tanto por fibras vírgenes de bambú y fibras recicladas de papel DKL, esto se puede apreciar en la figura 19. De igual forma, se observa que a mayor porcentaje de CNF, en la imagen C, existen mayores conexiones entre fibras. Esto concuerda

con lo mencionado por Kasmani & Samariha (2019) quienes aseguran que la adición de la CNF aumenta la capacidad de enlace, la concentración de las fibras llenando los espacios que existen entre estas y los finos, además incrementa la durabilidad del papel.



**Figura 19:** Papel mezcla con diferentes concentraciones de CNF al (A) 0 %; (B) 2 %; 6 % concentración. Las flechas indican la CNF interconectando las fibras.

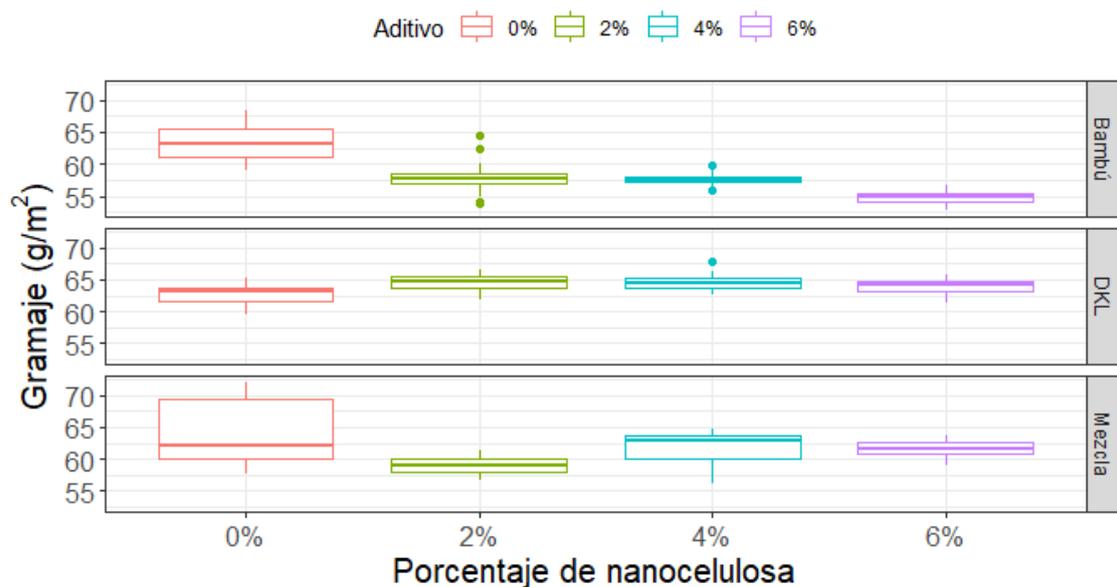
#### 4.7. Evaluaciones de los papeles aplicando CNF

Los resultados de los ensayos de papel, donde se utilizó la CNF como aditivo se presentan a continuación y los resultados del análisis de varianza y cumplimiento de supuestos se indican en los anexos.

#### 4.7.1. Propiedades físicas

##### a. Gramaje

Se presenta la variación de los resultados del gramaje con 0, 2, 4 y 6 por ciento de aditivo de CNF. Los valores de gramaje de los papeles con bambú varían desde un rango entre 60 a 65 g/m<sup>2</sup> con una tendencia a disminuir conforme se le agrega CNF, llegando hasta 55 g/m<sup>2</sup> de gramaje cuando se adiciona 6 por ciento de CNF. En la figura 20 se observa, para el caso del DKL un aumento del gramaje de 62,5 a 65 g/m<sup>2</sup> al agregar 2 por ciento de CNF; luego el valor del gramaje se mantiene constante. Los papeles elaborados de la mezcla presentan una variación irregular del gramaje disminuyendo hasta 57,5 g/m<sup>2</sup> con 2 % de CNF, aumentando nuevamente hasta 62,5 g/m<sup>2</sup> al 4 % de CNF, y culminando con 60 g/m<sup>2</sup> con 6 % de CNF.



**Figura 20:** Efecto de la CNF, en los tratamientos, sobre el gramaje de los papeles obtenidos.

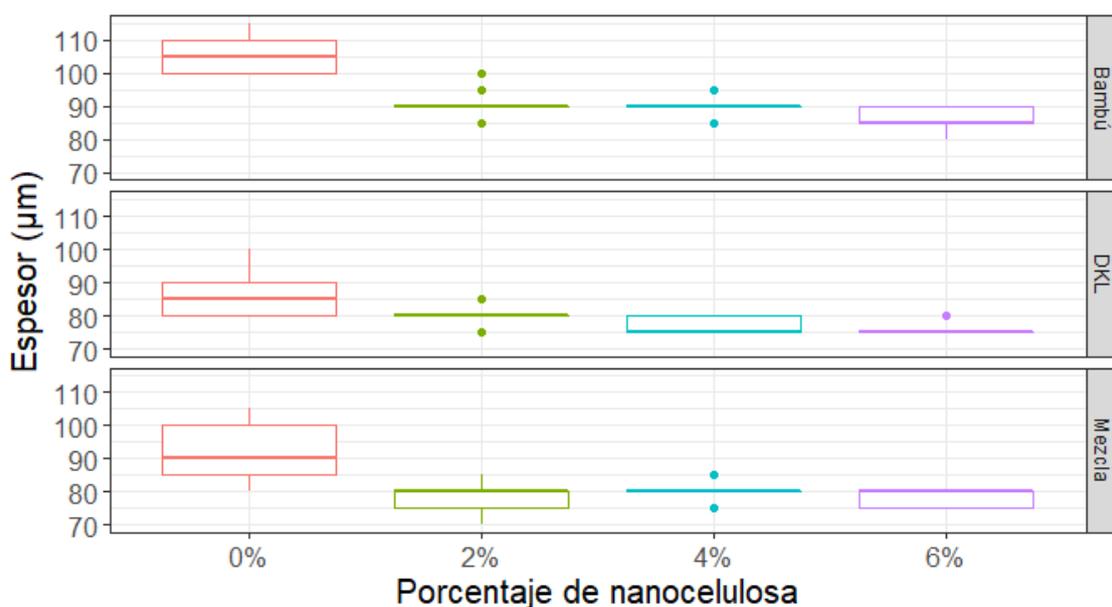
Estos resultados podrían ser explicados por las diferencias en los niveles de refinación de las fibras usadas. Al respecto, Delgado *et al.* (2015b) menciona que bajos niveles de refinado no permiten a las fibras alcanzar la suficiente capacidad de enlace y superficie específica, lo que dificulta la unión con la CNF, disminuyendo la capacidad de retención de fibras en el papel y por consiguiente del gramaje, como es el caso del papel de bambú. Se hace la observación que la disminución del gramaje en el papel de bambú sería causal de la baja capacidad de enlace entre fibras ocasionado por el refinado a 2000 revoluciones del bambú. Asimismo, se observa un bajo nivel de retención de la malla en la formadora de papel para

este tipo de fibra, ya que debido a su menor tamaño traspasan la malla #ASTM 140, la cual fue aplicada siguiendo la norma TAPPI T205.

A diferencia del papel de bambú, se observó un aumento en los valores del gramaje del papel DKL y su mezcla, pueden ser explicados por el aumento de masa en el papel ocasionado por la adición de CNF a las fibras (Pego *et al.*, 2020). Lo mencionado está relacionado con la capacidad de retención de las fibras lo cual se encuentra enlazado con su tamaño. Es así que, para el caso del bambú, autores como Zevallos (2019) considera longitudes de fibra para *Guadua angustifolia* Kunth de 2,4 mm esto es respaldado por estudios de Londoño (2002) quien menciona valores de longitud de fibra entre 1,7 mm y 4 mm para esta especie. Para las fibras de DKL utilizadas en el presente estudio se considera una longitud de fibra de 2,5 mm. Comparando la información del presente estudio y lo mencionado por Aguilar (2016) ambas fibras tienen longitudes mayores a las latifoliadas (1,5 mm) y valores cercanos a las coníferas (3,5 mm), por lo cual, es necesario considerar adaptar la formadora de papel con una malla de menor espaciamiento, para que pueda retener una mayor cantidad de fibra y evitar la disminución del gramaje.

#### **b. Espesor**

En el papel de bambú, DKL y mezcla los valores del espesor disminuyeron en 85, 75 y 80  $\mu\text{m}$ , respectivamente, al agregar 6 por ciento de CNF en los tres casos. La figura 21, presenta los resultados de la medición del espesor con 0, 2, 4 y 6 por ciento de aditivo de CNF. Se observa que el espesor disminuye conforme se agrega el aditivo de CNF, este comportamiento se repite en los tres tipos de muestras.



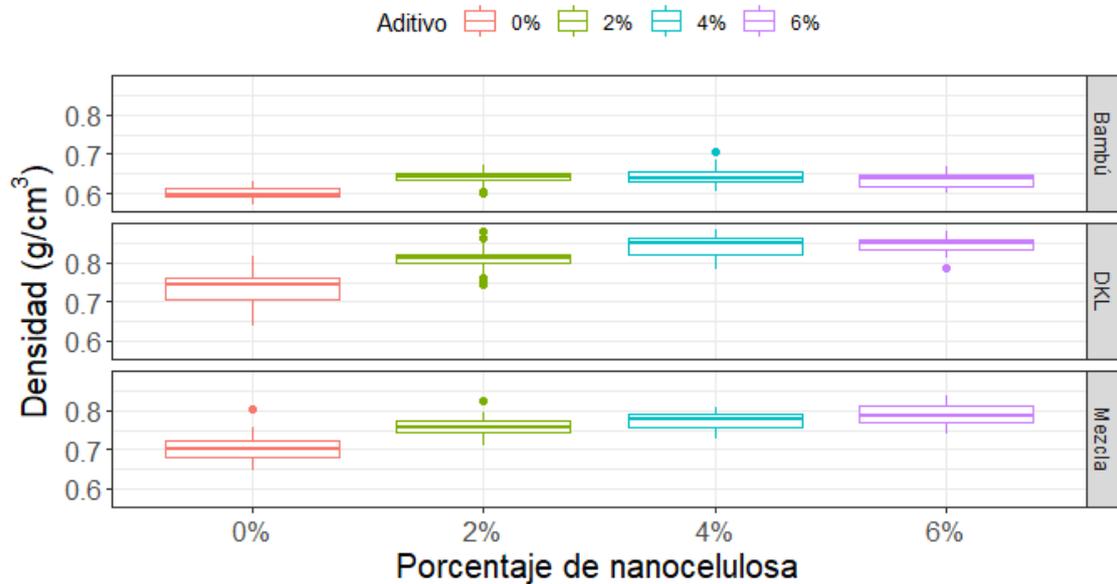
**Figura 21:** Efecto de la CNF, en los tratamientos, sobre el espesor de los papeles obtenidos.

La disminución del espesor en los tres tipos de muestra puede ser explicado, de acuerdo con Delgado (2015) por una mayor compactación de los componentes fibrosos en los papeles. Otros autores como Rubio (2018) explica que, para el bambú (*Guadua angustifolia*), el espesor de las fibras es influenciado por el grado de refinado y esto se encuentra estrechamente relacionado con el porcentaje de álcali. La disminución del espesor contradice lo expuesto por Pego *et al.* (2020) donde se tiene un aumento del espesor del papel frente al incremento de CNF, esta diferencia puede ser explicada por el método de aplicación de CNF; ya que el aumento del espesor se observa cuando esta se aplica de forma superficial como una barrera en el papel, en cambio, en la presente investigación la aplicación fue en masa como un componente adicional antes de la formación del papel, esto habría afectado la disposición de las fibras y causando la reducción del espesor.

### c. Densidad

En el papel de bambú la densidad pasa de tener un valor de  $0,6 \text{ g/cm}^3$  sin CNF a  $0,65 \text{ g/cm}^3$  con 6 por ciento de CNF, para los papeles con DKL la densidad aumento desde  $0,75 \text{ g/cm}^3$  hasta  $0,9 \text{ g/cm}^3$  con 6 por ciento de CNF, mismo escenario para los papeles con mezcla donde la densidad aumento desde un valor de  $0,7 \text{ g/cm}^3$  hasta  $0,8 \text{ g/cm}^3$ . Como se presenta

en la figura 22 la densidad aumenta con 0, 2, 4 y 6 por ciento de aditivo de CNF, esto ocurre en los tres tipos de muestra.



**Figura 22:** Efecto de la CNF, en los tratamientos, sobre la densidad de los papeles obtenidos.

El aumento de esta propiedad está en relación a la disminución del espesor, ya que al compactarse las fibras aumentan la cohesión entre ellas ocasionando un incremento en la densidad. Estudios realizados por Hubbe *et al.* (2017) menciona que la naturaleza flexible y las dimensiones de las CNF le permite formar estructuras entrecruzadas con las fibras, lo cual permite lograr altas densidades en los papeles. El papel de bambú logró un aumento máximo en la densidad de 8,3 por ciento y en el papel de DKL se alcanzó un 20 por ciento, mientras que los papeles con la mezcla lograron 14,3 por ciento de aumento en la densidad, en los tres tipos de papel el máximo aumento se logró al adicionar 6 por ciento de CNF. Lo mencionado es comparable con lo obtenido por Sehaqui *et al.* (2013) quien obtiene aumentos en la densidad entre 30 a 50 por ciento al aplicar 10 por ciento de CNF en hojas de pulpa de conífera, esto sería un indicativo de la relación directa entre el aumento de la densidad del papel con la cantidad de CNF que se aplica. Además, del presente estudio se destaca el aumento de la densidad en el papel DKL, esto al compararlo con los estudios de Potulski *et al.* (2018) quien obtuvo los mejores resultados en el aumento de la densidad y reducción del espesor, al agregar 9 por ciento de CNF a fibras recicladas de *Eucalyptus sp.* Para el caso del papel mezcla el aumento de la densidad es explicado por la combinación de las fibras del

bambú y las fibras recicladas del DKL. Una mayor densidad tendría como efecto la mejora de las propiedades finales del papel, es decir, para aumentar la densidad del papel, la presente investigación solo necesitó 6 por ciento de CNF, comparado con otras investigaciones mencionadas esto puede ser provechoso para elaborar papeles con altas densidades y utilizando menor cantidad de CNF.

#### d. Permeabilidad Gurley

En la tabla 13, se presenta los resultados de los ensayos de permeabilidad en los tres tipos de papeles con 0, 2, 4 y 6 por ciento de CNF. El análisis estadístico demuestra diferencias significativas entre los tratamientos: en el caso del papel de bambú se comprueba la diferencia significativa entre los tratamientos, pero para el papel DKL se observa que no hubo diferencia significativa al agregar la CNF en diferentes porcentajes, comparado con el papel mezcla donde cada tratamiento es significativamente diferente del otro.

**Tabla 13:** Análisis estadístico de la permeabilidad del papel en los diferentes tratamientos con CNF.

Concentración	Bambú		DKL		Mezcla	
	MT (*)		MT (*)		MT (*)	
0%	90,17647	a	8,54045	a	15,64285	a
2%	<b>34,84091</b>	<b>c</b>	0,63514	b	5,11022	b
4%	38,32500	c	0,65514	b	4,24086	c
6%	51,10000	b	<b>0,57365</b>	<b>b</b>	<b>3,38784</b>	<b>d</b>

Las comparaciones deben leerse verticalmente, letras diferentes indican diferencias significativas.

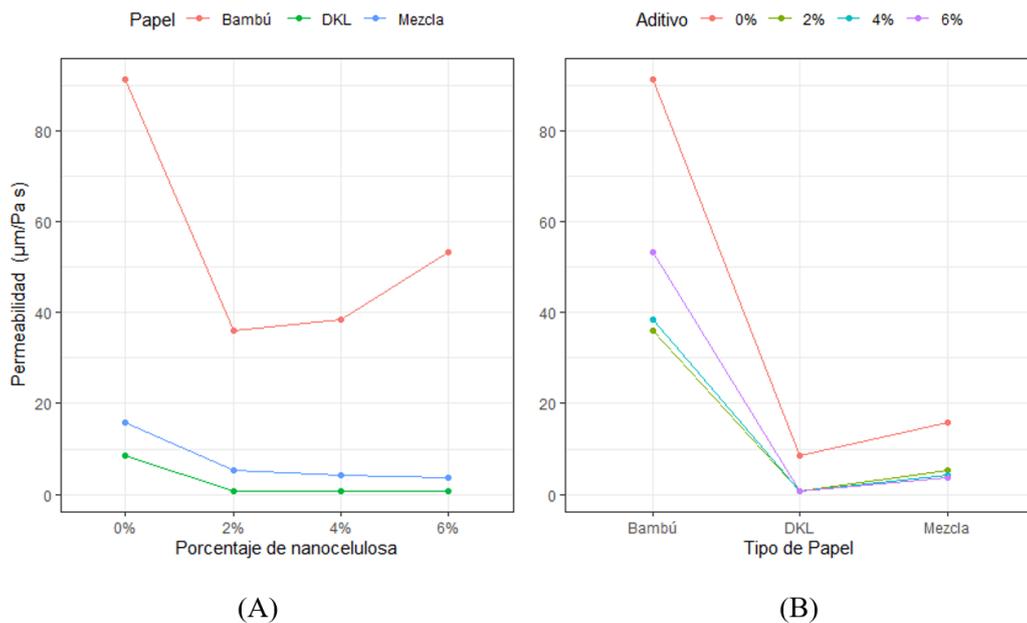
(\*) MT: Prueba de la mediana

La reducción de la permeabilidad en el papel de bambú, alcanzó el valor más bajo con 2 por ciento de CNF esto significa una disminución de la permeabilidad en 61,36 por ciento respecto al tratamiento base, el papel DKL y el papel mezcla se redujeron en un 93,32 y 78,38 por ciento, respectivamente al aplicarse 6 por ciento de CNF.

La permeabilidad Gurley evalúa el desplazamiento del aire a través del papel; en esta propiedad se observó una disminución de este valor en todos los papeles obtenidos al agregar

CNF, lo que implica una reducción de espacios vacíos en los papeles a causa de la interacción entre las fibras y la CNF; ocasionando un cambio en la estructura interna de los papeles debido a la compactación de las fibras y aumento de su área superficial por la fibrilación.

La figura 23 muestra la variación de la permeabilidad Gurley en los tres tipos de papel con 0, 2, 4 y 6 por ciento de CNF. Se observa que el papel de bambú varía sus valores con tendencia hiperbólica con valores que disminuyen hasta  $35 \mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$  con 2 por ciento de CNF, pero aumentando nuevamente a  $55 \mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$  al agregar 6 por ciento de CNF. En cambio, el papel DKL y el papel mezcla presenta curvas con comportamientos exponenciales y ambos disminuyen al incrementar el porcentaje de CNF, siendo sus valores mínimos de permeabilidad al agregar 6 por ciento de CNF.



**Figura 23:** Variación de la permeabilidad del papel en función a la aplicación de CNF (A) y a la CNF (B).

Los valores de permeabilidad en los papeles ensayados van en concordancia por lo expuesto por Lengowski *et al.* (2019) donde se afirma que la aplicación de CNF mejora las propiedades mecánicas reduciendo la permeabilidad y el drenaje de la masa de papel. Es decir, la baja porosidad de los papeles y la energía cohesiva de la CNF lograrían una capa lo

suficientemente densa para bloquear, además del aire, moléculas de aceites y gases (Thomas *et al.*, 2020). Esta propiedad de barrera en los papeles puede ser utilizada en los productos de embalaje de papel o embalaje de alimentos (Osong, 2016).

La norma TAPPI 460 menciona que la permeabilidad del aire esta influenciada por la estructura interna de las fibras, es decir, la longitud de las fibras, el nivel de hidratación, la orientación y compactación de estas, como variables importantes. Por lo tanto, se puede inferir que el mayor nivel de refinado aplicado a las fibras DKL influenció en la permeabilidad, una mayor fibrilación de las fibras sumado al aumento de los puentes de hidrógeno a causa de la elevada área específica de las CNF permitió la baja porosidad del papel (Pego *et al.*, 2020). Es así que, identificar las variaciones de la permeabilidad del aire del papel es de importancia debido a que tiene influencia en la resistencia, su apariencia visual y los requisitos que se le designen en su uso final (Kasmani & Samariha, 2019).

#### **4.7.2. Propiedades mecánicas**

En el presente estudio se evaluó la influencia de la aplicación de la CNF, sobre las propiedades del papel a diferentes concentraciones en cada papel, a través de las pruebas no paramétrica de comparaciones múltiples; se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis en caso se tenga la misma distribución, caso contrario se usó la prueba de la mediana.

##### **a. Resistencia a la tensión**

La variación gráfica de estos resultados se presenta en la figura 23. En la tabla 16 se presenta los resultados del análisis estadístico de la resistencia a la tensión: para el papel de bambú no se encontró diferencias significativas entre los resultados de tensión al agregar CNF. En estos resultados, el valor más alto se obtuvo al aplicar 6 por ciento de CNF. En el caso del papel DKL, si se encontró diferencia entre los tratamientos, excepto al agregar 2 y 4 por ciento de CNF; además el valor más elevado se obtuvo con 6 por ciento de CNF. El papel con la mezcla de fibras presentó diferencias significativas entre los tratamientos exceptuando al 4 y 6 por ciento de CNF, resaltando que el mayor valor se obtiene con 6 por ciento de CNF.

**Tabla 14:** Análisis estadístico de la resistencia a la tensión en los diferentes tratamientos, con CNF, en los papeles de bambú, DKL y su mezcla.

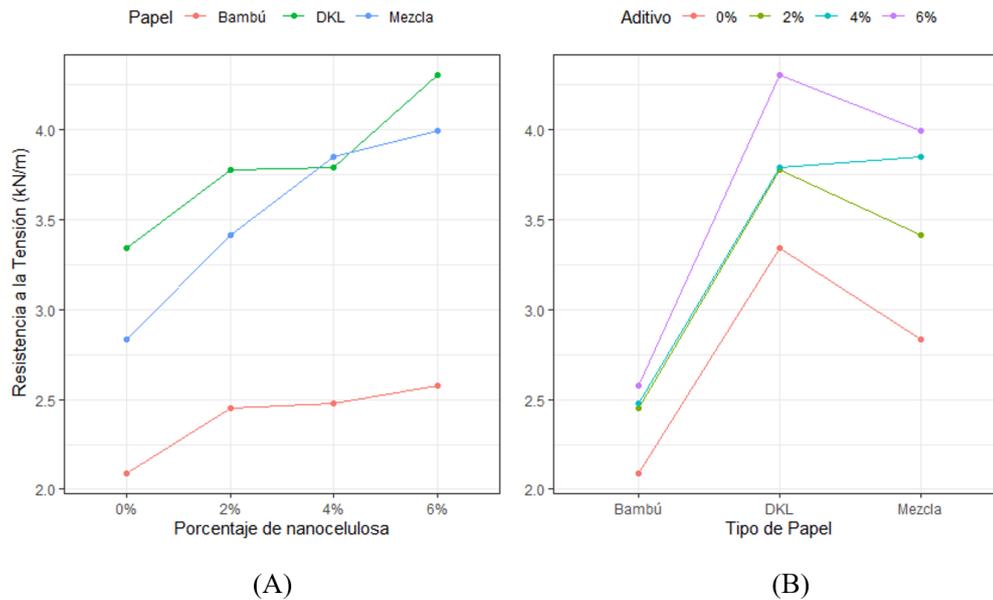
Concentración	Bambú		DKL		Mezcla	
	MT (*)		MT (*)		MT (*)	
0%	2,19023	b	3,33438	c	2,77865	c
2%	2,48444	a	3,79204	b	3,43245	b
4%	2,41906	a	3,85742	b	3,92280	a
6%	<b>2,61520</b>	<b>a</b>	<b>4,38046</b>	<b>a</b>	<b>3,95549</b>	<b>a</b>

Las comparaciones deben leerse verticalmente, letras diferentes indican diferencias significativas. Los valores en negrita representan el mayor valor obtenido.

(\*) MT: Prueba de la mediana.

La tabla presenta los valores iniciales sin adicionar CNF (0 %), así como los valores finales obtenidos al aplicar el mayor porcentaje de CNF (6 %). De esto se deduce que, el papel de bambú alcanza un aumento máximo en su valor de resistencia de 19,17 por ciento, el DKL de 31,51 por ciento y la mezcla 42,59 por ciento, en todos los casos comparando el mayor valor con el que no recibió CNF (0 %). Estos aumentos relativos son comparables con lo presentado por Balea *et al.* (2020) quien alcanza un aumento del 30 por ciento al agregar 3 por ciento (bms) de CNF a papeles reciclados provenientes de papel periódico viejo. Un aumento similar se registró para los papeles con DKL, fibras recicladas. Asimismo, Brodin *et al.* (2014) mencionan que para papeles provenientes de pulpas mecánicas y pulpas recicladas la adición de CNF dará buenos resultados, pero en el caso de pulpa química las CNF tendrán poco efecto. Lo antes mencionado concuerda con los resultados de la presente investigación donde se observa que los papeles con bambú tienen un aumento en la resistencia menor que el papel DKL y la mezcla el crecimiento de la resistencia a la tensión es mucho mayor. Tal como Eriksen *et al.* (2008) mencionan, el incremento en la resistencia a tensión dependerá de la cantidad de aditivo de CNF que se agrega al papel; además concluye que los aumentos significativos se observan desde la adición del 4 por ciento de CNF cuando se trabaja con hojas elaboradas a partir de TMP (pulpas termo mecánicas), lo cual es un indicio para otros tipos de papeles y con otras concentraciones.

En la figura 24 un aumento de la resistencia a la tensión y se observa que el comportamiento de las gráficas de forma logarítmica con tendencia al incremento.



**Figura 24:** Resistencia a la tensión en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).

Los aumentos en los valores de la resistencia a la tensión del presente estudio son valores esperados, lo que demuestra que la CNF en el papel tiene un efecto favorable para mejorar la capacidad de mejorar enlaces entre las fibras, lo que influye en el aumento de la capacidad de carga del papel. Taipale *et al.* (2010) comprobó que la adición de 3 por ciento CNF combinado con almidón catiónico incrementó la resistencia a la tensión de los papeles de madera blanda; estas condiciones se asemejan a la presente investigación donde se utilizaron como agentes de retención el almidón catiónico y sílice coloidal.

Otros autores como Reshmy *et al.* (2020) aseguran que agregar a las pulpas CNF aumenta las propiedades de tensión, haciéndola menos quebradiza, mejorando la densidad y la rigidez final del papel. Balea *et al.* (2016) mencionan que se debe tener precaución con el uso de CNF para aumentar la resistencia a la tensión, ya que la mejora de esta propiedad se debe al aumento de interacciones que ocurren en las fibras de las pulpas. Lo mencionado podría incluir un aumento en la retención de sólidos causando una disminución en la tasa del drenaje, ya documentada por otros autores e interpretada como un efecto de deterioro de la eficiencia de la CNF.

## b. Carga de tracción

En la tabla 15 se presentan los valores de carga de tracción de los tratamientos aplicados con CNF; la variación gráfica de estos resultados se presenta en la figura 24. En cuanto al papel de bambú no existe diferencia significativa entre el tratamiento base y la aplicación de CNF en los tres porcentajes. El papel DKL se observa diferencia significativa en tres de los tratamientos, pero considerando que al agregar 2 y 4 por ciento no existe una diferencia significativa entre ellos; la misma ocurrencia para el papel mezcla donde se observa la diferencia significativa excepto entre los tratamientos con 4 y 6 por ciento de CNF.

**Tabla 15:** Análisis estadístico de la resistencia a la tracción en los diferentes tratamientos con CNF en los papeles de bambú, DKL y su mezcla.

Concentración	Bambú		DKL		Mezcla	
	MT (*)		MT (*)		MT (*)	
0%	0,014889	b	0,02266	c	0,018888	<b>c</b>
2%	0,016889	a	0,02577	b	0,023333	<b>b</b>
4%	0,016444	a	0,02622	b	<b>0,026666</b>	<b>a</b>
6%	<b>0,017778</b>	<b>a</b>	<b>0,02777</b>	<b>a</b>	<b>0,026444</b>	<b>a</b>

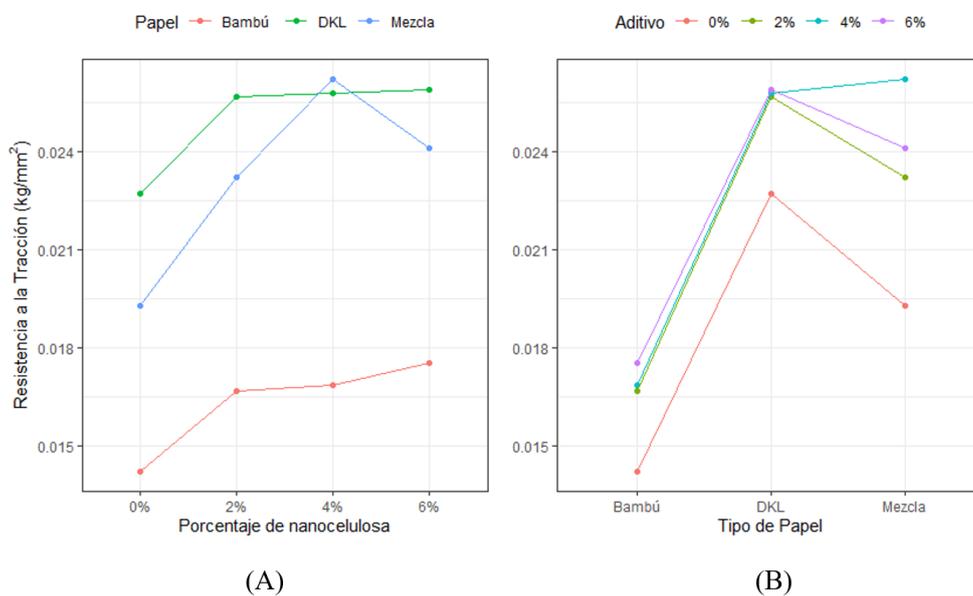
Las comparaciones deben leerse verticalmente, letras diferentes indican diferencias significativas. Los valores en negrita representan el mayor valor obtenido.

(\*) MT: Prueba de la mediana.

Los valores resultantes al aplicar la CNF se muestran en la tabla 17, siendo el valor mínimo el obtenido con 0 por ciento de CNF y el máximo, al adicionar 6 por ciento. De esta información se extrae que, porcentualmente el aumento máximo de la tracción en el papel de bambú y DKL fueron de 21,42 y 22,72 por ciento, respectivamente. Asimismo, para el caso del papel mezcla al agregar 4 y 6 por ciento de CNF la resistencia a la tracción aumentó en 41,48 y 46,66 por ciento, respectivamente. Por la relación directa entre la tracción con la tensión se observa un aumento de esta en todos los papeles, pero el porcentaje de aumento es menor que en la resistencia a la tensión debido a que esta propiedad está en relación al área de los papeles la cual es la misma para todos los tratamientos. El aumento de la tracción como de la tensión está relacionado a la adición de CNF a los papeles, la cual mejora la interacción de las fibras que conforman el papel, aumentando los enlaces de

contacto fibra-fibra, transfiriéndole la resistencia frente a ciertas demandas mecánicas (Thomas *et al.*, 2020).

La figura 25, muestran el comportamiento de los diferentes papeles en función de los valores de CNF utilizada con aditivo, se visualiza que la curva de resistencia a la tracción del papel de bambú tiene una curva de tendencia creciente; lo mismo ocurre con el papel DKL, esto a diferencia del papel mezcla que posee una curva tendencia hiperbólica con valores que decaen al aumentar el porcentaje de CNF.



**Figura 25:** Resistencia a la tracción en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).

Esta propiedad se encuentra en estrecha relación con la resistencia a la tensión, sin embargo, la diferencia es que esta se encuentra relacionada a la carga de rotura con el área de la hoja del papel en que se aplica.

### c. Resistencia al rasgado

En la tabla 16 se presentan los valores de resistencia al rasgado, obtenidas en el presente estudio; se muestra el análisis estadístico de estos valores, y donde se observa que para el

bambú no existe diferencia significativa al agregar 2 por ciento de CNF; pero si habría diferencia al adicionar 4 o 6 por ciento de CNF, pero sin distinción de ambos porcentajes, misma situación ocurre para el papel DKL y el papel mezcla.

**Tabla 16:** Análisis estadístico de la resistencia al rasgado en los diferentes tratamientos con CNF en los papeles de bambú, DKL y su mezcla.

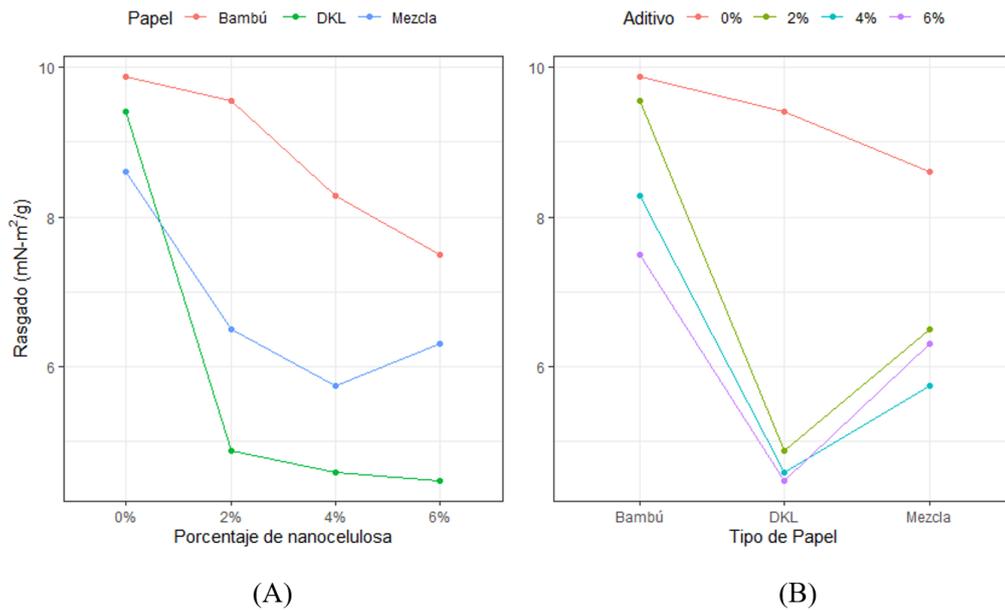
Concentración	Bambú		DKL		Mezcla	
	MT (*)		MT (*)		MT (*)	
0%	<b>9,713602</b>	<b>a</b>	<b>7,19005</b>	<b>a</b>	<b>8,68644</b>	<b>a</b>
2%	9,656588	a	4,92789	b	6,09006	bc
4%	8,702780	b	4,47740	bc	5,65184	c
6%	7,481031	b	4,47613	c	6,28996	b

Las comparaciones deben leerse verticalmente, letras diferentes indican diferencias significativas. Los valores en negrita representan el mayor valor obtenido.

(\*) MT: Prueba de la mediana.

Los mayores valores de rasgado se aprecian en los papeles con el tratamiento base de cero por ciento y se observa que al aumentar el porcentaje de CNF los valores de rasgado disminuyen. Porcentualmente, en el papel de bambú disminuye (22,96 %) con 6 por ciento de CNF, de igual forma para el papel DKL disminuye (37,74 %) al mismo porcentaje de CNF, siendo esta la mayor variación de rasgado de los tres tipos de papeles; por último, el papel mezcla disminuye (34,90 %) con un tratamiento de 4 por ciento de CNF. En la propiedad de rasgado se refiere a la fuerza que se necesita para propagar una grieta en el papel luego de hacer un corte, su disminución frente a la presencia de CNF era un resultado esperado. Los valores obtenidos en este estudio son similares a los que obtuvo Kasmani & Samariha (2019) quienes corroboran con su investigación que al aumento de dosis de CNF la resistencia al desgarro disminuye llegando hasta 8 mN.m<sup>2</sup>/g; para la presente investigación los valores descendieron hasta 4 mN.m<sup>2</sup>/g en el papel de DKL. Esto coincide con Dufresne (2019) quien afirma que la baja resistencia al rasgado es uno de los inconvenientes de los papeles elaborados con CNF.

En la figura 26, se aprecia la disminución de la propiedad del rasgado en todos los tratamientos con 0, 2, 4 y 6 por ciento de CNF. Las tres curvas de los papeles presentan una curva con tendencia decreciente.



**Figura 26:** Resistencia al rasgado en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).

El comportamiento de estas variables podría ser explicado por autores como Djafari *et al.* (2019) quienes confirman esta reducción del rasgado, asegurando que la adición de microfibrillas de celulosa afecta de forma negativa la resistencia al rasgado del papel. Balea *et al.* (2019), sin embargo, mencionan que el índice de rasgado puede aumentar a causa de los enlaces hidrógeno que se incrementa con el contenido de CNF; pero esta se vería disminuida por la cantidad de fibras cortas en el papel las cuales facilitan el desgarramiento de la hoja. Según Tozluoğlu *et al.* (2015) la resistencia al rasgado depende en general a la resistencia individual de las fibras, y pocas veces del grado de unión entre estas; además afirma que el refinado disminuye esta propiedad en las pulpas luego de lograr un valor máximo inicial. En la investigación realizada, los resultados se explicarían por el tratamiento mecánico de homogenización a altas revoluciones con el cual se aplicaron las CNF a las fibras, afectando la resistencia al rasgado de los papeles. Asimismo, se propone que la reducción de esta propiedad puede ser ocasionada por la forma de aplicación de las CNF en los papeles, ya que Lengowski (2016) obtiene aumentos (hasta 44 %) en el rasgado al aplicar la CNF de forma superficial como una capa sobre el papel, a diferencia de la investigación que aplicó la CNF en masa.

#### d. Resistencia al plegado

En la tabla 17 se presentan los valores del análisis estadístico de la resistencia al plegado, donde se muestra que en el papel de bambú hay diferencia significativa entre los tratamientos aplicados, en cambio en el papel DKL se observó diferencia significativa entre el tratamiento sin CNF (0 %) y con el tratamiento con 2 por ciento de CNF. En el caso del papel mezcla si hubo diferencia significativa entre todos los tratamientos.

**Tabla 17:** Análisis estadístico de la resistencia al plegado en los diferentes tratamientos con CNF en los papeles de bambú, DKL y su mezcla.

Concentración	Bambú		DKL		Mezcla	
	MT (*)		MT (*)		MT (*)	
0%	20	c	2132	b	318	d
2%	84	ab	<b>2768</b>	<b>a</b>	890	c
4%	<b>104</b>	<b>a</b>	2230	b	1262	b
6%	80	b	2728	ab	<b>1904</b>	<b>a</b>

Las comparaciones deben leerse verticalmente, letras diferentes indican diferencias significativas.

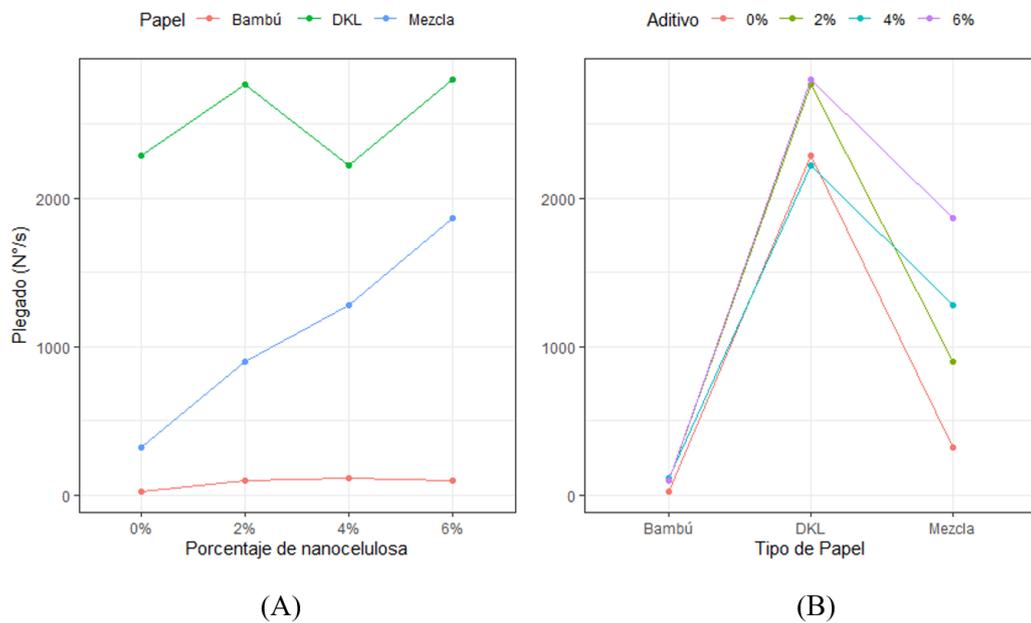
Los valores en negrita representan el mayor valor obtenido.

(\*) MT: Prueba de la mediana.

La prueba de resistencia al plegado mostró valores diferentes entre el papel de bambú, DKL y la mezcla, siendo cada tratamiento base (0 % de CNF) de 20, 2132 y 318 número de dobleces del papel, respectivamente. La marcada diferencia entre los tipos de papel esta influenciado por la diferencia de tamaños entre las fibras de bambú y las fibras recicladas de DKL, siendo estas últimas de mayor longitud. De esta información se seleccionó el tratamiento con el mayor valor para calcular el máximo valor porcentual. El papel de bambú obtuvo el máximo valor con 4 por ciento de CNF, alcanzándose un aumento del plegado de más de 4 veces (420 %); con DKL el mayor aumento fue menor (29,83 %) al aplicar 2 por ciento de CNF; en el papel con la mezcla se logró aumento de casi 5 veces (478,74 %) al añadir 6 por ciento de CNF. Estos resultados, de aumento de resistencia al plegado, son similares a los obtenidos por Zeng *et al.* (2021) quien obtuvo un incremento entre 25 a 75 % en el plegado al aplicar CNF en papeles reciclados, pero logró hasta seis veces (600 %) de aumento al utilizar fibra larga y reforzarla con 5 por ciento de CNF. Mencionando que este resultado podría ser causada por la orientación y flexibilidad de las fibras. Pego *et al.* (2020)

se registró aumentos del plegado de casi 3 veces (271,6 %) al agregar 10 por ciento de CNF en hojas formadas con fibras de sisal y eucalipto. Otro autor, como Kim *et al.* (2019), obtuvo, con la adición de 5 por ciento de CNF en papel de pulpa mixta de algodón, un aumento de casi 5 veces (464 %) en los resultados de plegado.

En la figura 27, se aprecia para el papel de bambú, una curva creciente representando el número de pliegues en función de las cantidades de CNF, en cambio con el papel DKL la variación es irregular. En el papel con mezcla de fibras presenta una curva creciente frente a la aplicación de CNF.



**Figura 27:** Resistencia al plegado en relación al papel de bambú, DKL y mezcla (A), y en relación al porcentaje de CNF (B).

La resistencia al plegado explica el comportamiento del papel frente a una fatiga constante de una hoja, expresada como número de pliegues hasta que se rompe el papel. Lo antes descrito, relacionado con el presente estudio, supondría que la adición de CNF favorece la unión entre fibras, retardando la ruptura del papel, aumentando la resistencia al plegado. Tal como se observa en la figura 26, complementando los resultados porcentuales mostrados, la mayor variación se obtuvo en el papel mezcla y el papel de bambú; esto sería explicado por la capacidad de enlace de la fibra virgen de bambú con los componentes fibrosos de las fibras

DKL. La CNF aportaría un mayor número de uniones por lo tanto una red de fibras enlazadas y más resistente. Además, se debe tener en cuenta la sensibilidad de este ensayo, el cual puede verse afectado por la temperatura del ambiente o el espesor del papel.

#### 4.8. Selección del mejor tratamiento

Al final de este estudio, se determinó el mejor tratamiento utilizando la prueba no paramétrica de comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis o la prueba de la mediana. La tabla 18 muestra el análisis estadístico entre los valores más significativos en cada propiedad y por tipo de papel. Lo cual evidencia que entre todos los tratamientos existe diferencias significativas, excepto en la propiedad de rasgado donde la aplicación de CNF en ninguno de los papeles tuvo significancia.

**Tabla 18:** Selección del mejor tratamiento.

<b>Permeabilidad</b>	<b>Tensión</b>			<b>Tracción</b>			<b>Rasgado</b>			<b>Plegado</b>		
(*)	(*)			(*)			(**)			(*)		
b_2 34,840 a	<b>dkl_6</b>	<b>4,380</b>	a	<b>dkl_6</b>	<b>0,027</b>	a	<b>b_0</b>	<b>6,666</b>	a	<b>dkl_2</b>	<b>2768</b>	a
m_6 3,387 b	m_4	3,922	b	m_4	0,026	a	<b>m_0</b>	<b>4,333</b>	a	m_6	1904	b
<b>dkl_2</b> <b>0,635</b> c	b_2	2,484	c	b_2	0,016	b	<b>dkl_0</b>	<b>4,000</b>	a	b_4	104	c

Tipos de papel: bambú, dkl, mezcla; % NCF: 0, 2, 4, 6

(\*): Prueba de la mediana, (\*\*): Prueba Kruskal-Wallis

Para el caso de la permeabilidad, la tensión, la tracción y el plegado, al no cumplir los supuestos de Kruskal Wallis se realizó la prueba de la mediana para determinar las diferencias significativas entre el mejor tratamiento de cada tipo de papel y en cada propiedad. Para el caso del rasgado si se logra realizar la prueba de Kruskal Wallis (K-W) esta es una prueba más precisa ya que realiza un ranqueo de los datos para reducir el error.

Se seleccionó el mejor tratamiento según las cinco propiedades analizadas mediante la prueba K-W, en función de la mayor significancia y dentro de esto aquel valor más adecuado

para los papeles elaborados. Para la propiedad de permeabilidad el valor más representativo se obtuvo con el papel DKL con 2 por ciento de CNF. En cuanto la propiedad de la tensión, se seleccionó el mayor valor que se obtuvo con el tratamiento de 6 por ciento en el papel DKL, y de manera similar, la tracción fue seleccionada con el papel DKL al 6 por ciento de CNF. Asimismo, para la propiedad del rasgado los mejores valores se obtuvieron cuando no se adicionó la CNF en los tres tipos de papeles. Por último, en resistencia al plegado, el tratamiento con 2 % de CNF en papel DKL obtuvo el mayor valor para esta propiedad.

A pesar de que en cada propiedad se escoge un mejor tratamiento por su significancia con el resto, su mayor valor o cantidad de aditivo de CNF, se observa que la selección dependerá del tipo de papel que se requiere y cuál será su aplicación final. Por lo descrito, se deduce que la elección del mejor tratamiento estará sujeto a la elección del producto final que se quiere fabricar. Para Das *et al.* (2020) las diferencias en los papeles se pueden corregir ajustando las dosis de CNF y el grado de fibrilación de esta. El mismo autor asegura que la aplicación de CNF ayuda al papel a recuperar sus propiedades de resistencia, a veces perdida por la utilización de diversos minerales como rellenos. Asimismo, Dufresne (2019) explica que la aplicación de CNF mejora la resistencia a la tracción, resistencia al estallido, densidad, limita la permeabilidad del aire, mejora la capacidad de retención de cargas y tintes adsorbentes de los papeles y cartones. La mejora en las propiedades con la CNF de refuerzo significaría una disminución en el consumo de materias primas, y un aumento en el uso de fibras recicladas, pudiendo obtener resultados similares, impulsando la reducción de costos e impactos ambientales reducidos en la industria del papel (Li *et al.*, 2021).

Asimismo, la técnica utilizada en la investigación para la obtención de CNF fue con un pretratamiento químico con TEMPO y un tratamiento mecánico con homogeneizador de altas revoluciones. La aplicación de CNF como aditivo elaborado con la técnica con el radical TEMPO - 2,2,6,6-tetrametilpiperidin-1-oxil, según Zhang *et al.* (2013), poseen una función mejorada debido a la presencia de grupos carboxilatos en la superficie de las fibrillas las cuales al formar enlaces con las fibras del papel ocasionan mejoras en las propiedades. Bahar *et al.* (2013) explica que la aplicación de CNF proporciona diversas ventajas como la compatibilidad con fibra, soporta la estabilización de la capacidad de ejecución, sobre todo, al inicio de la fabricación del papel, además reduce la rotura del papel, es decir, incrementa la tensión. Sin embargo, Lourenço *et al.* (2020) aseguran que el uso de CNF en la elaboración

del papel está influenciado por los elementos que lo conforma, y la presencia o ausencia de estos afectará significativamente las uniones con la CNF. Es decir, la aplicación de CNF como refuerzo del papel, logra su objetivo como potenciador de las propiedades físicas y mecánicas del papel, pero siempre considerando el tipo de papel que se va utilizar, sus elementos y la tecnología a aplicar.

## V. CONCLUSIONES

1. El uso de la celulosa nanofibrilar (CNF) proveniente de tallos de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth como aditivo en papeles elaborados con fibra virgen, fibras recicladas y la mezcla de ambos, influyó en las propiedades físicas y mecánicas de los papeles elaborados.
2. Las partículas de CNF obtenida mediante métodos químicos con el oxidante TEMPO obtuvieron dimensiones que alcanzaron longitudes entre 1 a 2  $\mu\text{m}$ .
3. Se registró un aumento en el gramaje del papel DKL y en la densidad de los tres tipos de papel, de igual forma se destaca la reducción del 92 % de la permeabilidad de Gurley en el papel mezcla debido a la red interconectada de CNF, finalmente un aumento de más de 5 veces en el plegado del papel mezcla.
4. El mejor tratamiento para la permeabilidad fue con 2 % de CNF en papel DKL. La tensión y tracción obtuvieron mejores resultados con el tratamiento con 6 % de CNF en papel DKL. El plegado evidenció un mayor valor con 2 % de CNF en el papel DKL.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Analizar a mayor profundidad la relación entre el refinado de las fibras y su combinación con la adición de CNF en el papel.
2. Aumentar el número de revoluciones al utilizar un homogeneizador de altas revoluciones en la elaboración de CNF.
3. Realizar estudios complementarios de la CNF de *Guadua angustifolia* Kunth aplicando otros métodos de obtención.
4. Ajustar la malla de la formadora de papel a una con menor abertura para reducir la pérdida de fibras al momento de su elaboración.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abitbol, T., Rivkin, A., Cao, Y., Nevo, Y., Abraham, E., Ben, T., Lapidot, S., & Shoseyov, O. (2016). Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 39, 76–88.
- Aguilar, N. (2004). Celulosa blanqueada ECF y TCF de cartón Kraft reciclado. *Revista Ciencia Forestal en México*, 27(91), 83-96.
- Aguilar, N. (2004). El reciclado de papel y cartón. *Elementos*, (53), 54-56.
- Aguilar, N. (2016). Pulpa de bagazo de caña con alto índice de fibra larga. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(2), 047-055.
- Altamirano, M. (2010). *Pulpa Kraft con Acer pseudoplatanus (Tesis de Grado)*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Alzate, A., & Alzate, H. (2012). Métodos utilizados en el destintado del papel desperdicio-aproximación al estado del arte. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 6(1), 9-25.
- Andrade, A., & Pereira, M. (2019). Métodos de deconstrucción de la pared celular. En M. Vallejos y M. Area (Eds.) *Nanocelia – producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada* (pp. 36-62). Misiones, Argentina: Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales.
- Añazco, M. (2013). Estudio de vulnerabilidad del bambú (*Guadua angustifolia*) al cambio climático en la costa del Ecuador y Perú. Quito, Ecuador: Unión Europea.
- Añazco, M., & Rojas, S. (2015). Estudio de la cadena de producción al consumo de bambú (*Guadua angustifolia*) en Perú. Quito, Ecuador: Red Internacional de Bambú y Ratán.
- Area, M. (2017). EL reciclado en la fabricación de papel y cartón. *Revista del Corrugado*, (24), 18-21.

- Area, M. C. (2019). Fibras, estructura y topoquímica. En M. Vallejos y M. Area (Eds.) *Nanocelia – producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada* (pp. 20-35). Misiones, Argentina: Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales.
- Azeez, M. (2018). Pulping of non-woody biomass. In S. Newaz (Ed.) *Pulp and Paper Processing* (pp. 55-86). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79749>
- Bahar, N., Hidayat, T., Elyani, N., & Rostika, I. (2013). The potential of nanocellulose from *Acacia mangium* pulp for specialty paper making. *Jurnal Selulosa*, 3(1), 1-8.
- Bajpai, P. (2010). Overview of Pulp and Papermaking Processes. In *Environmentally Friendly Production of Pulp and Paper* (pp. 8-45). Hoboken, United States: John Wiley & Sons, Inc. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470649657>
- Balea, A., Blanco, Á., Monte, M. C., Merayo, N., & Negro, C. (2016). Effect of bleached eucalyptus and pine cellulose nanofibers on the physico-mechanical properties of cartonboard. *BioResources*, 11(4), 8123-8138. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.8123-8138>
- Balea, A., Sanchez, J., Monte, M., Merayo, N., Negro, C., & Blanco, A. (2019). In Situ Production and Application of Cellulose Nanofibers to Improve Recycled Paper Production. *Molecules*, 24(9), 1800. <https://doi.org/10.3390/molecules24091800>
- Borges, F., Colodette, J., & Gomes, F. (2018). Utilizacao do bamboo como matéria-prima na obtencao de polpa celulósica voltada á fabricacao de papel de embalagem sackraft. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 4(4). <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss4pp0405-0411>
- Bousios, S., & Worrell, E. (2017). Towards a Multiple Input-Multiple Output paper mill: Opportunities for alternative raw materials and sidestream valorisation in the paper and board industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.020>
- Brodin, F., Gregersen, ØW., & Syverud, K. (2014) Cellulose nanofibrils: challenges and possibilities as a paper additive or coating material: a review. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 29(1), 156–166. <https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-01-p156-166>

Cadena, E. (2008). *Estudio del refinado de pastas de papel utilizando métodos biotecnológicos (Tesis de Doctorado)*. Universidad Politécnica de Cataluña, Terrasa, España.

Cali, C., & Remache, E. (2019). *Análisis y revisión del proceso de abastecimiento de la materia prima para la elaboración del papel kraft liner y corrugado medio en papelera nacional S.A. Universidad Estatal de Milagro, Ecuador (Tesis de grado)*. Universidad Estatal de Milagro, Ecuador.

Camacho, M. (2013). *Estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental de la producción a escala industrial de nanocelulosa obtenida a partir de los desechos agroindustriales de la cascara de pina (Ananas comosus) (Tesis de Maestría)*. Universidad de Costa Rica.

CARTOPEL. Proceso de fabricación de papel en molino Cartopel. Cuenca, Ecuador. Disponible en: <http://www.cartopel.com/i/files/fabricacionpapel.pdf>

CARVIMSA (Cartones Villa Marina S.A). Papel: papel doméstico. Disponible en: <https://www.carvimsa.com/>

Castro, C. F., & Delgado, F. (2016). La nanocelulosa: propiedades y aplicaciones. *Boletín IIE*, 56-60.

Christoph, R., & Muñoz, R. (2015). Nanocelulosa – Primeros pininos en el Salvador. Instituto de Ciencias, Tecnología e Innovación.

Colom, J., García, J., Torres, A., & Vidal, T. (2001). Retos medioambientales de la industria papelera. *Ingeniería Química*, (380), 215-225.

CORPEI (Corporación de Promoción de Exportaciones e Inversiones) (2003). Perfil de producto bambú (caña *Guadua angustifolia*) “caña brava”. Quito, Ecuador: Proyecto CORPEI – CBI.

Costa, M., & Colodette, J. L. (2007). The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(1), 61–71. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000100006>

Cuellar, A., & Muñoz, I. (2010). Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Dyna*, 77(162), 137142.

Damásio, R. (2015). *Caracterização e aplicações de celuloses nanofibrilada (CNF) e nanocristalina (CNC) (Tesis de Maestría)*. Universidad Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Das, A., Islam, M., Ashaduzzaman, M., & Nazhad, M. (2020). Nanocellulose: its applications, consequences and challenges in papermaking. *Journal of Packaging Technology and Research*. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00097-7>

Delgado, M. (2015). *Nanotecnología en el sector papelero: mejoras en calidad y permanencia de las fibras de alto rendimiento y secundarias en una economía circular mediante el uso de nanofibras y el refinado enzimático (Tesis de Doctorado)*. Universidad de Girona, España.

Delgado, M., González, I., Tarrés, Q., & Alcalá, M. (2015a). Approaching a low-Cost production of cellulose nanofibers for papermaking applications. *BioResources*, 10(3): 5345-5355.

Delgado, M., Recas, E., Puig, J., Arbat, G., Pereira, M., Vilaseca, F., Mutjé, P. (2015b). Aplicación de celulosa nanofibrilada, en masa y superficie, a la pulpa mecánica de muela de piedra: una sólida alternativa al tratamiento clásico de refinado. *Maderas: Ciencia y tecnología*, 17(2), 293-304. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000028>

Djafari, S., Syverud, K., Chinga-Carrasco, G., Ghasemian, A., & Resalati, H. (2014). Effects of bagasse microfibrillated cellulose and cationic polyacrylamide on key properties of bagasse paper. *Carbohydrate Polymers*, 99, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.073>

Domínguez, M., Hernández, R., & Medina, R. (2017). Innovación y sustentabilidad de la industria de papel en México. *Revista Global de Negocios*, 5(5): 87-97.

Dufresne, A. (2019). Nanocellulose Processing Properties and Potential Applications. *Curr Forestry*, 5, 76–89. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00088-1>

Eichhorn, S., Dufresne, A., Aranguren, M., Marcovich, N., Capadona, J., Rowan, S., Weder, C., Thielemans, W., Roman, M., Renneckar, S., Gindl, W., Veigel, S., Keckes, J., Yano, H., Abe, K., Nogi, M., Nakagaito, A., Mangalam, A., Simonsen, J., Benight, A., Bismarck, A.,

- Berglund, L., & Peijs, T. (2010). Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 45(1), 1-33.
- Endes, C., Camarero, S., Mueller, S., Foster, E., Petri-Fink, A., Rothen, B., Weder, C & Clift, M. (2016). A critical review of the current knowledge regarding the biological impact of nanocellulose. *Journal of Nanobiotechnology*, 14(78), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s12951-016-0230-9>
- Espinoza, A. (2010). *Aptitud de Guadua angustifolia Kunth en la elaboración de tableros aglomerados con cemento (Tesis de Grado)*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- Espinoza, D. (2003). *La Cadena de la Guadua en Colombia*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Giri, J., & Adhikari, R. (2013). A Brief review on extraction of nanocellulose and its application. *Bibechana*, 9, 81-87.
- Gómez, E., Ríos, L., Peña, J. (2012). Madera, un potencial material lignocelulósicos para la producción de Biocombustibles en Colombia. *Información tecnológica*, 23(6), 73-86.
- Gonzales, H. (2003). Recursos fibrosos de plantas no madereras para la industria papelera.
- Gonzales, H. (2005). *Elaboración de una propuesta para el aprovechamiento y la transformación del bambú en el ámbito del PRODAPP (Puerto Inca-Oxapampa)*. Lima, Perú: Informe final Comisión Europea.
- Gonzales, H. (2010). *Merceología de papel: interpretación de los capítulos 47, 48 y 49 del Arancel de Aduanas*.
- González, I., Boufi, S., Peláech, M., Alcalá, M., Vilaseca, F., & Mutjé, P. (2012). Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucalyptus pulps. *BioResources*, 7(4), 5167-5180.
- González, I., Vilaseca, F., Marqués, E., Alcalá, M., & Mutjé, P. (2013). Desde el papel al nanopapel: evolución de las propiedades. En *Simposio Internacional sobre materiales lignocelulósicos*. CONAMET.

- Gulsoy, K., Kustas, S., & Erenturk, S. (2013). The Effect of Old Corrugated Container (OCC) Pulp Addition on the Properties of Paper Made with Virgin Softwood Kraft Pulps. *BioResources*, 8(4), 5842-5849. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5842-5849>
- Gutierrez, G. (2015). *Caracterización de los productos obtenidos por destilación seca de bambú (Guadua angustifolia Kunth.) procedente del distrito de la La Florida, San Miguel, Cajamarca (Tesis de Grado)*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Gutiérrez, M. (2011). *Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de Guadua angustifolia Kunth (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hart, P., & Rudie, A. (2004). Anthraquinon: a review of the rise and fall of a pulping catalyst. *ReserchGate*, 3(10), 23-31.
- Hidalgo, O. (2003). *Bamboo. The gift of the gods*. Bogotá, Colombia: D'VINNI Press LTDA.
- Hubbe, M., Ferrer, A., Tyagi, P., Yin, Y., Salas, C., Pal, L., & Rojas, O. (2017). Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: A review. *BioResources*, 12(1), 2143-2233.
- Hurtado, S. (2017). *Estandarización del proceso de obtención de fibra de Guadua angustifolia kunth como materia prima para material compuesto (Título de grado)*. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Hurter, R. (2001). Non-wood plant fiber uses in paper making short course notes extracted from "Agricultural residues". Ontario, Canada.
- Ioelovich, M. (2009). Nano-structural concept of papermaking. *SITA*, 11(1), 52-60.
- Ioelovich, M., & Figovsky, O. (2010). Structure and properties of nanoparticles used in paper compositions. *Mechanics of Composite Materials*, 46(4).
- Izarga, U., Abreu, L., Machado, E., Díaz, N., & Marín, R. (2007). Potencialidades fibrosas de eucaliptos en pinar del río. *Revista Forestal Baracoa*, 26(1).
- Jahan, M., Rahman, M., & Sarkar, M. (2016). Upgrading old corrugated cardboard (OCC) to dissolving pulp. *Cellulose*, 23(3), 2039–2047. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-016-0894-1>

- Judziewicz, E., Clark, L., Londoño, X., & Stern, M. (1999). American Bamboos.
- Junior, M., Novack, K., Botaro, R., Protásio, T., & Couto, A. (2013). Caracterização físico-química de fibra e polpas de *Bambusa vulgaris* Schrad para utilização em compósitos poliméricos. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 33(1), 33-42.
- Kalia, A., Boufi, S., Celli, A., & Kango, S. (2014). Nanofibrillated cellulose: surface modification and potential applications. *Colloid and Polymer Science*, 292, 5-31.
- Kamoga, L., Byaruhanga, J., & Kirabira, J. (2013). A review on pulp manufacture from non-wood plant materials. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 4(3), 144-148.
- Kargarzadeh, H., Mariano, M., Gopakumar, D., Ahmda, I., Thomas, S., Dufresne, A., Huang, J., & Lin, N. (2018). Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose*, 1-39.
- Kasmani, J., & Samariha, A. (2019). Effect of Nano-cellulose on the improvement of the properties of paper newspaper produced from chemi-mechanical pulping. *BioResources*, 14(4), 8935-8949.
- Kim, J. H., Sup, B., Soo, H., Lee, Y. J., Min, S. K., Jang, D., Abas, Z., & Kim, J. (2015). Review of Nanocellulose for Sustainable Future Materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-green Technology*, 2(2), 197-213. <http://dx.doi.org/10.1007/s40684-015-0024-9>
- Kim, K., Lee, J., Jo, H., & Kim, S. (2019). Cellulose nanofibril grades effect on the strength and drainability of security paper. *Bioresources*, 14(4), 8364-8375.
- Lengowski, E. (2016). *Formation and characterization of films with nanocellulose (Doctoral thesis)*. Federal University of Paraná, Curitiba, Brasil. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13458.86722>
- Lengowski, E., Bonfatti, E., Nishidate, M., Carneiro, M., & Gundappa, K. (2019). Nanocellulose in the Paper Making. *Springer*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05399-4\\_361027-1065](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05399-4_361027-1065).
- Li, A., Xu, D., Luo, L., Zhou, Y., Yan, W., Leng, X., Dai, D., Zhou, Y., Ahmad, H., Rao, J., & Fan, M. (2021). Overview of nanocellulose as additives in paper processing and paper

products. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 264-281. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0023>

Liu, Z., Wang, H., & Lanfeng, H. (2018). Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers. In S. Newaz (Ed.) *Pulp and Paper Processing* (pp. 1 -31). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79017>.

Londoño, X. (2011). El bambú en Colombia. *Biotecnología Vegetal*, 11(3), 143-154.

Londoño, X. (2013). Guadua para el Perú (POACEAE: BAMBUSOIDEAE: BAMBUSEAE: GUADUINAE). *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 7(1), 145-153. <https://www.jstor.org/stable/24621061>.

Londoño, X., Camayo, G., Riaño, N., & López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *The Journal of the American Bamboo Society*, 16(1), 18-31.

Lopez, A. (2011). Bambú: biología, cultivo, manejo y usos en el Perú. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura.

López, M. A., Cevallos, M., Alcívar, J., Dueñas, E., & Riera, M. A. (2021). Residuos del banano (*Musa paradisiaca*) como materia prima alternativa en la elaboración de papel. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 8(1), 35-46. [https://revistas.up.ac.pa/index.php/revista\\_colon\\_ctn](https://revistas.up.ac.pa/index.php/revista_colon_ctn)

Lourenço, A., Gamelas, J., Sarmiento, P., & Ferreira, P. (2020). A comprehensive study on nanocelluloses in papermaking: the influence of common additives on filler retention and paper strength. *Cellulose*. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03105-w>

Lumiaine, J. (1998). Refining of chemical pulp. In *Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End*.

Mabee, W. (1999). La importancia de las fibras recuperadas para el suministro mundial de fibra. *Unasylva*, 49(193).

Mariano, M., Kissi, N., & Dufresne, A. (2014). Cellulose Nanocrystals and Related Nanocomposites: Review of some properties and Challenges. *Journal of Polymer Science pt B: Polymer Physics*, (52), 791-806.

- Marques, G. (2010). *Valorización de diferentes cultivos lignocelulósicos para la fabricación de pasta de papel: caracterización química, modificación estructural de sus constituyentes orgánicos durante los procesos de cocción y blanqueo y aplicaciones biotecnológicas (Tesis Doctoral)*. Universidad de Sevilla, España.
- Meng, F., Wang, G., Du, X., Wang, Z., Xu, S., & Zhang, Y. (2018). Preparation and characterization of cellulose nanofibers and nanocrystals from liquefied banana pseudo-stem residue. *Composites Part B: Engineering*, *160*(1), 341-347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08>
- Moon, R., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, *40*, 3941–3994. <http://dx.doi.org/10.1039/C0CS00108B>
- Moreno, G. (2015). *Propuesta de minimización de residuos en los efluentes de industria cartonera Incasa (Tesis de Grado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Motaung, E., & Liganiso, L. (2018). Critical review on agrowaste cellulose applications for biopolymers. *International Journal of Plastics Technology*, *22*(2), 185–216. <https://doi.org/10.1007/s12588-018-9219-6>
- Muñoz, B. (2018). *Síntesis y caracterización de nanocelulosas de orígenes diversos (Tesis de Grado)*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, España.
- Mussatto, S., Rocha, G., & Roberto, I. (2008). Hydrogen peroxide bleaching of cellulose pulps obtained from brewer's spent grain. *Cellulose*, *15*, 641–649.
- Osong, S. (2016). *Mechanical Pulp-Based Nanocellulose: Processing and applications relating to paper and paperboard, composite films, and foams (Doctoral thesis)*. Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden.
- Osong, S., Norgren, S., & Engstrand, P. (2015). Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review. *Cellulose*, *23*(1), 93-123.

- Palacios, J., & Vallejo, M. (2011). Aprovechamiento del agua del rebose del tanque del decker en el área de reciclado para disminuir el flujo al efluente. Colombia: Instituto Tecnológico de Colima.
- Pande, H. (1999). Fibras no leñosas suministro mundial de fibras. *Unasylva*, 49(193). <http://www.fao.org/3/w7990s08.htm>.
- Park, C., Han, S., Namgung, H., Seo, P., & Lee, S. (2017). Overview of the Preparation Methods of Nano-scale Cellulose. *Journal of Korea*, 49(1), 9-17.
- Pego, M., Bianchi, M., & Yasumura, P. (2020). Nanocellulose reinforcement in paper produced from fiber blending. *Wood Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01226-w>
- Pélach, M., & Mutjé, P. (2012). Reciclado celulósico: Proceso de desintegración o pulpeado. Brasil: RIARREC.
- Peng, B., Dhar, N., Liu, H. L., & Tam, K. C. (2011). Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: a nanotechnology perspective. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89, 1191–1206.
- Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, 1, 32-43.
- Potulski, D., Viana, L., Namikata, A. P., Braz, M., Bolzon, G., & Sulato, A. (2018). Nanocelulose aplicada como reforço para papel reciclado. *Scientia Forestalis*, 46(119), 495-505.
- Pulido, E., Morales, B., Zamudio, M., & Lugo, F. (2016). Obtención y caracterización de nanocelulosa a partir de tule (*Typha domingensis*). *Revista de Energía Química y Física*, 3-6, 31-38.
- Quintana, M. (2011). *Uso de antraquinona en cocción Kraft de Eucalyptus globulus y Eucalyptus nitens (Tesis de Maestría)*. Universidad Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Reshmy, R., Philip, E., Paul, S., Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., & Sirohi, A. (2020). Nanocellulose-based products for sustainable applications recent trends and possibilities. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09551-z>

- Resolución Directoral N° 0048, 2018. Ministerio del Ambiente. Perú. 10 abril del 2018.
- Resquin, F. (2003). La aptitud papelera: del árbol al papel. *El País Agropecuario*, 49-52.
- Reyes, J. (2006). *Caracterización química y toxicológica de un efluente de la etapa el de blanqueo de celulosa kraft mediante una técnica de fraccionamiento (Tesis de Grado)*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Rivera, J; Anzaldo, J; Becerra, B; Ramos, J; Sanjuán, R; Colodette, J. (2008). Procesos de blanqueo a base de oxígeno aplicados a pulpa obtenida del cartón corrugado reciclado (OCC) (pp. 1-11). En *V Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel*. Guadalajara, México: CIADICYP.
- Rivera, M. (2012). *Implementación de nuevas secuencias de blanqueo en pulpa de Eucalipto para maximizar el desarrollo de la fibra y minimizar la materia orgánica en el afluente (Tesis de Grado)*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Robles, N., Saucedo, A., Delgado, E., Sanjuán, R., & Turrado, J. (2014). Efecto de las microfibras de celulosa sobre papel con alto contenido de fibra reciclada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 70-79.
- Rolón, J., Mués, F., Rodríguez, M., Tucci, V., & Rodríguez, M. (2016). Análisis de los costos de producción de pulpa de celulosa: métodos kraft y mecánico. *Energía*, 7(8), 1-12.
- Rubio, M. F. (2018). *Pulpa química, método soda antraquinona, a partir de tallos de Guadua angustifolia y Bambusa vulgaris (Tesis de Grado)*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- Ruiz, J. (2004). *Determinación de factores ambientales para el crecimiento de hongos (Lentinus edodes y Stereum hirsutum) y su acción biodegradante sobre la madera de Pinus radiata y Eucalyptus globulus (Tesis de Grado)*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ruiz, J. (2004). *Determinación de factores ambientales para el crecimiento de hongos (Lentinus edodes y Stereum hirsutum) y su acción biodegradante sobre la madera de Pinus radiata y Eucalyptus globulus (Tesis de Grado)*. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Saito, T., Kimura, S., Nishiyama, Y., & Isogai, A. (2007). Cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules*, 8(8), 2485-2491.

Samyn, P., Barhoum, A., O' hlund, T., & Dufresne, A. (2018). Review: nanoparticles and nanostructured materials in papermaking. *Journal of Materials Science*, 53, 146–184. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1525-4>

Sánchez, L., Aita, G., Robert, D., & Rodríguez, M. (2014). Correlation between chemical compounds and mechanical response in culms of two different ages of *Guadua angustifolia* Kunth. *Madera y Bosques*, 20(2), 87-64.

SCAN (Scandinavian pulp, paper and board) (1964). Drainability of pulp by the schopper-riegler method. Norma SCAN-C19:65.

Sehaqui, H., Zhou, Q., & Berglund, L. (2013). Nanofibrillated cellulose for enhancement of strength in high-density paper structures. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 28(2), 182–189.

Sixta, H. (2006). Handbook of pulp. Alemania: Wiley-VCH.

SOREPA (Sociedad Recuperadora de Papel) (2018). Presentación – SOREPA. Disponible en: <http://www.santiagorecicla.cl/wp-content/uploads/2018/08/Presentaci%C3%B3n-Sorepa.pdf>.

Taipale, T., Österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J., & Laine, J. (2010) Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength. *Cellulose*, 17, 1005–1020. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9431-9>

Tapia, D. (2005). *Propiedades del licor negro bajo la influencia de la carga y formulación de antraquinona en pulpaje kraft (Tesis de Grado)*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1995). Fiber length of pulp by classification. Norma T 233 cm-95.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1993). Kappa number of pulp. Norma T 236 cm-85.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1996). Opacity of paper (15/d geometry, illuminant A/2°, 89% reflectante backing and paper backing). Norma T 425 om-96

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1994). Moisture in pulp; paper and paperboard. Norma T 412 om-94.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1996). Folding endurance of paper (MIT tester). Norma T 511 om-96.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1998). Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method). Norma T 414 om-98.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1992). Tensile breaking strength and elongation of paper and paperboard (using pendulum-type tester). Norma 404 cm-92.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1996). Air resistance of paper (Gurley method). Norma T 460 om-96.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1998). Brightness of pulp, paper, and paperboard (directional reflectance at 457 nm). Norma T 452 om-98.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1997). Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board. Norma T 411 om-97.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (1998). Grammage of paper and paperboard (weight per unit area). Norma T 410 om-98.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (2006). Forming handsheets for physical tests of pulp. Norma T 205 sp-02.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (2000). Laboratory beating of pulp (PFI mill method). Norma T 248 sp-00.

Tayeb, A., Amini, E., & Tajvidi, M. (2018). Cellulose nanomaterials-binding properties and applications: a review. *Molecules*, (23), 1-24.

Teixeira, D. (2012). Recycled old corrugated container fibers for wood-fiber cement sheets. *International Scholarly Research Notices*. <https://doi.org/10.5402/2012/923413>

Teschke, K., & Demers, P. (1998). Industria del papel y de la pasta de papel. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, 3(72).

Thomas, P., Duolikun, T., Rumjit, P., Moosavi, S., Wei, C., Rafie, M., & Bey, L. (2020). Comprehensive review on nanocellulose: Recent developments, challenges and future

prospects. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 110, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103884>

Torres, L., Melo, R., & Colodette, J. (2005). Pulpa kraft blanqueada a partir de *Pinus tecunumanii*. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 115-122. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002005000200014>.

Tozluoğlu, A., Özyurek, Ö., Çöpür, Y., & Özdemir, H. (2015). Integrated production of biofilm, bioethanol, and papermaking pulp from wheat straw. *BioResources*, 10(4), 7834-7853.

Turrado, S., Saucedo, C., Pérez, R., G. Iñiguez, C., F. López, D., Villar, G., & Mutje, P. (2008). Tecnología en la Fabricación del Papel. *Panorama de la Industria de Celulosa y Papel en Iberoamérica 2008*, 151–202.

Turrado, J., Saucedo, A., Sanjuán, R., & Sulbaran, Belkis. (2009). PINZOTE de *Musa balbisiana* y *Musa acuminata* como Fuente de Fibras para Papel. *Información tecnológica*, 20(4), 117-122. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000400013>.

Turriate, C. (2002). *Estudio técnico-experimental de la obtención de pulpa de papel a partir de papel recuperado y diseño de planta (Tesis de Grado)*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Wistara, N., Purnamasari, D., & Indrawan, D. (2012). The Properties of Bamboo and Old Corrugated Containers Pulp Mixture. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 10(2), 112-121.

Yang, Z., Shi, H., & Tang, Y. (2012). Changes in Layer Properties and Physical Properties of Papers from Old Corrugated Container Fibres with PDADMAC/HEC Polyelectrolyte Multilayers. *Advanced Materials Research*, 496, 67–70. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.496.67>

Zeng, J., Zeng, Z., Cheng, Z., Wang, Y., Wang, X., Wang B., & Gao, W. (2021). Cellulose nanofibrils manufactured by various methods with application as paper strength additives. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91420-y>

Zevallos, A. (2019). *Estudio biométrico de fibras en tres especies de bambú – estación experimental UNCP Satipo – Junín (Tesis de grado)*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Zhang, W., Johnson, R., Lin, Z., Chandoha, C., Zink-Sharp, A., & Renneckar, S. (2013). In situ generated cellulose nanoparticles to enhance the hydrophobicity of paper. *Cellulose*, 20(6), 2935–2945. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0062-9>

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Ficha técnica del oxidante TEMPO.

**SIGMA-ALDRICH®**

[sigma-aldrich.com](http://sigma-aldrich.com)

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)

Email USA: [techserv@sial.com](mailto:techserv@sial.com)

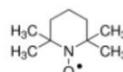
Outside USA: [eurtechserv@sial.com](mailto:eurtechserv@sial.com)

### Product Specification

Product Name:  
TEMPO - 98%

Product Number: 214000  
CAS Number: 2564-83-2

Formula: C<sub>9</sub>H<sub>18</sub>NO  
Formula Weight: 156.25 g/mol  
Storage Temperature: 2 - 8 °C



#### TEST

#### Specification

Appearance (Colour)

Orange to Dark Orange and Red to Dark Red

Appearance (Form)

Powder or Solid or Crystals or

Crystalline Chunk(s) or Chunk(s)

Purity (GC)

≥ 97.5 %

Solubility (Colour)

Orange to Red

Solubility (Turbidity)

Clear to Very Slightly Hazy

50MG/ML IN ETHANOL

Infrared Spectrum

Conforms to Structure

Specification: PRE.0.ZQ5.10000018057

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at [Sigma-Aldrich.com](http://Sigma-Aldrich.com). For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

1 of 1

Anexo 2: Base de datos.

<b>Papel</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Repetición</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>Tensión</b>	<b>Tracción</b>	<b>Plegado</b>	<b>Rasgado</b>
Bambú	0%	1	85.16666667	2.2883	0.01555556	24	10.4697421
Bambú	0%	1	90.17647059	1.3076	0.00888889	36	
Bambú	0%	1	80.68421053	1.24222	0.00844444	20	
Bambú	0%	1	90.17647059	2.22292	0.01511111	24	
Bambú	0%	1	90.17647059	2.15754	0.01466667	24	
Bambú	0%	1	95.8125	3.00748	0.02044444	20	
Bambú	0%	1	102.2	1.56912	0.01066667	16	
Bambú	0%	1	90.17647059	2.54982	0.01733333	16	
Bambú	0%	1	90.17647059	2.81134	0.01911111	24	
Bambú	0%	1	90.17647059	2.74596	0.01866667	20	
Bambú	0%	2	90.17647059	1.6345	0.01111111	20	9.43547595
Bambú	0%	2	102.2	1.69988	0.01155556	40	
Bambú	0%	2	117.9230769	1.83064	0.01244444	16	
Bambú	0%	2	95.8125	2.09216	0.01422222	32	
Bambú	0%	2	102.2	2.35368	0.016	20	
Bambú	0%	2	102.2	2.22292	0.01511111	16	
Bambú	0%	2	102.2	1.50374	0.01022222	16	
Bambú	0%	2	102.2	1.50374	0.01022222	20	
Bambú	0%	2	102.2	1.76526	0.012	20	
Bambú	0%	2	95.8125	1.37298	0.00933333	20	
Bambú	0%	3	73	2.15754	0.01466667	28	9.71360167
Bambú	0%	3	80.68421053	2.35368	0.016	44	
Bambú	0%	3	66.65217391	2.68058	0.01822222	24	
Bambú	0%	3	80.68421053	2.54982	0.01733333	20	
Bambú	0%	3	85.16666667	1.9614	0.01333333	16	
Bambú	0%	3	90.17647059	2.22292	0.01511111	20	

Bambú	0%	3	85.16666667	2.15754	0.01466667	24	
Bambú	0%	3	95.8125	2.22292	0.01511111	24	
Bambú	0%	3	80.68421053	2.22292	0.01511111	40	
Bambú	0%	3	80.68421053	2.22292	0.01511111	44	
Bambú	2%	1	31.9375	3.00748	0.02044444	100	9.2536791
Bambú	2%	1	31.28571429	2.81134	0.01911111	144	
Bambú	2%	1	32.61702128	2.2883	0.01555556	88	
Bambú	2%	1	36.5	2.48444	0.01688889	72	
Bambú	2%	1	32.61702128	2.6152	0.01777778	172	
Bambú	2%	1	28.38888889	2.22292	0.01511111	120	
Bambú	2%	1	34.06666667	2.48444	0.01688889	152	
Bambú	2%	1	43.8	2.54982	0.01733333	104	
Bambú	2%	1	42.58333333	2.48444	0.01688889	152	
Bambú	2%	1	39.30769231	2.41906	0.01644444	140	
Bambú	2%	2	40.34210526	2.2883	0.01555556	80	9.65658812
Bambú	2%	2	24.33333333	2.6152	0.01777778	180	
Bambú	2%	2	34.06666667	2.81134	0.01911111	140	
Bambú	2%	2	40.34210526	2.41906	0.01644444	60	
Bambú	2%	2	35.65116279	2.48444	0.01688889	80	
Bambú	2%	2	37.3902439	2.35368	0.016	64	
Bambú	2%	2	34.84090909	2.54982	0.01733333	100	
Bambú	2%	2	43.8	2.48444	0.01688889	72	
Bambú	2%	2	29.48076923	1.9614	0.01333333	68	
Bambú	2%	2	46.45454545	2.15754	0.01466667	40	
Bambú	2%	3	39.30769231	1.9614	0.01333333	52	9.73810728
Bambú	2%	3	34.06666667	2.48444	0.01688889	48	
Bambú	2%	3	34.84090909	2.54982	0.01733333	60	
Bambú	2%	3	32.61702128	2.6152	0.01777778	172	

Bambú	2%	3	34.84090909	2.2883	0.01555556	64	
Bambú	2%	3	41.43243243	2.54982	0.01733333	92	
Bambú	2%	3	42.58333333	2.48444	0.01688889	80	
Bambú	2%	3	30.66	2.35368	0.016	68	
Bambú	2%	3	32.61702128	2.22292	0.01511111	144	
Bambú	2%	3	37.3902439	2.48444	0.01688889	64	
Bambú	4%	1	36.5	2.9421	0.02	104	8.76579498
Bambú	4%	1	41.43243243	2.48444	0.01688889	88	
Bambú	4%	1	37.3902439	2.2883	0.01555556	152	
Bambú	4%	1	45.08823529	2.81134	0.01911111	136	
Bambú	4%	1	39.30769231	2.2883	0.01555556	320	
Bambú	4%	1	37.3902439	2.22292	0.01511111	116	
Bambú	4%	1	45.08823529	2.35368	0.016	64	
Bambú	4%	1	41.43243243	2.6152	0.01777778	136	
Bambú	4%	1	30.05882353	2.41906	0.01644444	104	
Bambú	4%	1	39.30769231	2.48444	0.01688889	144	
Bambú	4%	2	43.8	2.41906	0.01644444	100	8.70277998
Bambú	4%	2	36.5	2.35368	0.016	104	
Bambú	4%	2	36.5	2.35368	0.016	68	
Bambú	4%	2	34.06666667	2.81134	0.01911111	112	
Bambú	4%	2	36.5	2.35368	0.016	64	
Bambú	4%	2	42.58333333	2.2883	0.01555556	128	
Bambú	4%	2	40.34210526	2.2883	0.01555556	84	
Bambú	4%	2	30.66	2.35368	0.016	96	
Bambú	4%	2	31.9375	2.48444	0.01688889	52	
Bambú	4%	2	37.3902439	2.74596	0.01866667	68	
Bambú	4%	3	40.34210526	2.41906	0.01644444	72	7.38735654
Bambú	4%	3	33.32608696	2.81134	0.01911111	264	

Bambú	4%	3	39.30769231	2.22292	0.01511111	68	
Bambú	4%	3	37.3902439	2.15754	0.01466667	188	
Bambú	4%	3	40.34210526	2.87672	0.01955556	48	
Bambú	4%	3	38.325	2.6152	0.01777778	76	
Bambú	4%	3	30.66	2.48444	0.01688889	148	
Bambú	4%	3	39.30769231	2.48444	0.01688889	120	
Bambú	4%	3	38.325	2.2883	0.01555556	64	
Bambú	4%	3	49.4516129	2.54982	0.01733333	116	
Bambú	6%	1	43.8	2.87672	0.01955556	64	6.88302034
Bambú	6%	1	43.8	2.81134	0.01911111	84	
Bambú	6%	1	45.08823529	2.41906	0.01644444	88	
Bambú	6%	1	39.30769231	2.22292	0.01511111	200	
Bambú	6%	1	45.08823529	2.48444	0.01688889	60	
Bambú	6%	1	90.17647059	2.6152	0.01777778	32	
Bambú	6%	1	47.90625	2.2883	0.01555556	80	
Bambú	6%	1	46.45454545	2.68058	0.01822222	76	
Bambú	6%	1	45.08823529	2.6152	0.01777778	100	
Bambú	6%	1	51.1	2.48444	0.01688889	80	
Bambú	6%	2	69.68181818	2.6152	0.01777778	80	8.11415331
Bambú	6%	2	61.32	2.68058	0.01822222	216	
Bambú	6%	2	51.1	2.48444	0.01688889	64	
Bambú	6%	2	52.86206897	2.81134	0.01911111	88	
Bambú	6%	2	66.65217391	2.41906	0.01644444	48	
Bambú	6%	2	56.77777778	2.22292	0.01511111	56	
Bambú	6%	2	54.75	2.2883	0.01555556	64	
Bambú	6%	2	61.32	2.6152	0.01777778	80	
Bambú	6%	2	54.75	2.22292	0.01511111	76	
Bambú	6%	2	42.58333333	2.41906	0.01644444	140	

Bambú	6%	3	58.96153846	2.74596	0.01866667	260	7.48103097
Bambú	6%	3	47.90625	2.9421	0.02	120	
Bambú	6%	3	66.65217391	2.48444	0.01688889	80	
Bambú	6%	3	49.4516129	2.81134	0.01911111	76	
Bambú	6%	3	49.4516129	2.87672	0.01955556	144	
Bambú	6%	3	56.77777778	2.48444	0.01688889	148	
Bambú	6%	3	52.86206897	2.81134	0.01911111	120	
Bambú	6%	3	51.1	2.68058	0.01822222	80	
Bambú	6%	3	51.1	2.68058	0.01822222	196	
Bambú	6%	3	47.90625	2.48444	0.01688889	88	
DKL	0%	1	7.064516129	3.98818	0.02711111	2587.2	14.4387171
DKL	0%	1	9.017647059	3.269	0.02222222	2524.8	
DKL	0%	1	7.441747573	3.46514	0.02355556	2599.2	
DKL	0%	1	7.231132075	3.46514	0.02355556	962.4	
DKL	0%	1	8.56424581	3.53052	0.024	1312.8	
DKL	0%	1	6.813333333	2.87672	0.01955556	1887	
DKL	0%	1	10.42857143	3.269	0.02222222	3036	
DKL	0%	1	10.645833333	3.269	0.02222222	1887	
DKL	0%	1	10.08552632	3.39976	0.02311111	916.8	
DKL	0%	1	8.154255319	3.269	0.02222222	1156.8	
DKL	0%	2	12.99152542	3.00748	0.02044444	1200	6.59924616
DKL	0%	2	7.441747573	3.00748	0.02044444	4320	
DKL	0%	2	7.902061856	3.5959	0.02444444	1440	
DKL	0%	2	10.2885906	3.53052	0.024	2180	
DKL	0%	2	8.56424581	3.5959	0.02444444	4560	
DKL	0%	2	6.753303965	3.5959	0.02444444	1800	
DKL	0%	2	7.943005181	3.20362	0.02177778	1960	
DKL	0%	2	8.56424581	2.74596	0.01866667	1920	

DKL	0%	2	7.3	3.269	0.02222222	2420	
DKL	0%	2	8.861271676	3.53052	0.024	2040	
DKL	0%	3	6.694323144	3.269	0.02222222	1960	7.19005519
DKL	0%	3	7.902061856	3.07286	0.02088889	2684	
DKL	0%	3	9.290909091	3.66128	0.02488889	2528	
DKL	0%	3	8.861271676	3.66128	0.02488889	2400	
DKL	0%	3	8.068421053	3.72666	0.02533333	2152	
DKL	0%	3	7.551724138	3.66128	0.02488889	3552	
DKL	0%	3	8.612359551	3.00748	0.02044444	4460	
DKL	0%	3	8.516666667	2.9421	0.02	2432	
DKL	0%	3	10.57241379	2.68058	0.01822222	1448	
DKL	0%	3	10.95	3.66128	0.02488889	2112	
DKL	2%	1	0.525179856	4.2497	0.02888889	3452	5.07830371
DKL	2%	1	0.471112477	3.72666	0.02533333	3088	
DKL	2%	1	0.429772918	3.33438	0.02266667	3400	
DKL	2%	1	0.429652466	4.83812	0.03288889	2548	
DKL	2%	1	0.567777778	3.85742	0.02622222	3164	
DKL	2%	1	0.497081712	4.11894	0.028	3588	
DKL	2%	1	0.587581449	3.5959	0.02444444	3372	
DKL	2%	1	0.428092712	3.72666	0.02533333	2848	
DKL	2%	1	0.579146203	3.33438	0.02266667	3492	
DKL	2%	1	0.494995157	3.9228	0.02666667	2128	
DKL	2%	2	0.808544304	3.46514	0.02355556	1460	4.92789903
DKL	2%	2	0.837704918	4.11894	0.028	1680	
DKL	2%	2	0.51117039	3.98818	0.02711111	2928	
DKL	2%	2	0.548283262	2.9421	0.02	1012	
DKL	2%	2	0.663636364	3.72666	0.02533333	1020	
DKL	2%	2	0.782941777	3.9228	0.02666667	3480	

DKL	2%	2	0.881541116	3.79204	0.02577778	1724	
DKL	2%	2	1.331885317	3.98818	0.02711111	2096	
DKL	2%	2	0.814992026	3.72666	0.02533333	6040	
DKL	2%	2	0.779755849	3.46514	0.02355556	5720	
DKL	2%	3	0.777777778	3.79204	0.02577778	2468	4.63267527
DKL	2%	3	1.580412371	3.79204	0.02577778	3120	
DKL	2%	3	0.771903323	4.05356	0.02755556	2896	
DKL	2%	3	0.647381757	3.00748	0.02044444	2368	
DKL	2%	3	0.50812065	3.98818	0.02711111	1220	
DKL	2%	3	1.035111411	3.79204	0.02577778	2420	
DKL	2%	3	0.622917513	3.33438	0.02266667	2184	
DKL	2%	3	2.752244165	4.18432	0.02844444	2388	
DKL	2%	3	0.714685315	4.18432	0.02844444	2688	
DKL	2%	3	0.384789157	3.269	0.02222222	2980	
DKL	4%	1	0.791838843	3.72666	0.02533333	3696	4.83040691
DKL	4%	1	0.419425445	3.39976	0.02311111	720	
DKL	4%	1	0.692724808	3.9228	0.02666667	2520	
DKL	4%	1	0.564848931	3.53052	0.024	3080	
DKL	4%	1	0.475939149	3.46514	0.02355556	820	
DKL	4%	1	0.564640884	4.5766	0.03111111	2272	
DKL	4%	1	0.531369151	4.44584	0.03022222	1976	
DKL	4%	1	0.566518847	3.79204	0.02577778	3700	
DKL	4%	1	0.686827957	3.5959	0.02444444	1940	
DKL	4%	1	0.665942659	3.9228	0.02666667	2303	
DKL	4%	2	0.519661017	3.85742	0.02622222	616	4.47740343
DKL	4%	2	0.644930585	3.85742	0.02622222	2956	
DKL	4%	2	0.628536285	3.53052	0.024	2392	
DKL	4%	2	0.536764706	3.9228	0.02666667	3504	

DKL	4%	2	0.7	3.9228	0.02666667	1720	
DKL	4%	2	0.394493052	2.87672	0.01955556	3536	
DKL	4%	2	0.796363636	3.00748	0.02044444	1820	
DKL	4%	2	0.665364583	3.66128	0.02488889	2360	
DKL	4%	2	0.541122485	3.9228	0.02666667	548	
DKL	4%	2	1.05651275	3.5959	0.02444444	2280	
DKL	4%	3	0.540169133	3.53052	0.024	1628	4.43542917
DKL	4%	3	0.854038997	3.20362	0.02177778	2240	
DKL	4%	3	0.945712523	4.5766	0.03111111	2184	
DKL	4%	3	0.703856749	3.79204	0.02577778	1740	
DKL	4%	3	0.832247557	4.18432	0.02844444	2180	
DKL	4%	3	0.576315789	3.9228	0.02666667	1052	
DKL	4%	3	1.119795471	3.9228	0.02666667	3988	
DKL	4%	3	0.640083507	3.85742	0.02622222	2220	
DKL	4%	3	0.845093716	3.98818	0.02711111	2208	
DKL	4%	3	0.702566453	4.18432	0.02844444	2304	
DKL	6%	1	0.769578313	4.44584	0.03022222	2880	4.47613017
DKL	6%	1	0.740937651	3.5959	0.02444444	2192	
DKL	6%	1	1.035810811	4.31508	0.02933333	2240	
DKL	6%	1	1.077301476	4.44584	0.03022222	3756	
DKL	6%	1	4.034210526	3.98818	0.02711111	2172	
DKL	6%	1	1.351851852	4.38046	0.02977778	2928	
DKL	6%	1	1.276436303	4.70736	0.032	4960	
DKL	6%	1	0.98206278	4.51122	0.03066667	2260	
DKL	6%	1	0.803459119	4.38046	0.02977778	5520	
DKL	6%	1	2.326251897	4.38046	0.02977778	3900	
DKL	6%	2	0.488216561	4.38046	0.02977778	3040	4.43827995
DKL	6%	2	0.530817175	4.83812	0.03288889	3732	

DKL	6%	2	0.541313559	4.05356	0.02755556	2880	
DKL	6%	2	0.529899758	4.70736	0.032	1200	
DKL	6%	2	0.377493228	4.11894	0.028	4360	
DKL	6%	2	0.392272262	3.9228	0.02666667	2520	
DKL	6%	2	0.443448076	4.5766	0.03111111	1520	
DKL	6%	2	0.452345825	3.5959	0.02444444	656	
DKL	6%	2	0.346284165	4.31508	0.02933333	3788	
DKL	6%	2	0.547304534	4.2497	0.02888889	2776	
DKL	6%	3	0.394290123	4.70736	0.0209216	1260	4.49033743
DKL	6%	3	0.440517241	4.96888	0.02208391	1940	
DKL	6%	3	0.585561497	4.18432	0.01859698	2712	
DKL	6%	3	0.596266044	3.5959	0.01598178	4800	
DKL	6%	3	0.548087236	4.18432	0.01859698	4408	
DKL	6%	3	0.740222115	4.38046	0.01946871	960	
DKL	6%	3	0.545163585	4.2497	0.01888756	1140	
DKL	6%	3	0.561744229	4.05356	0.01801582	2540	
DKL	6%	3	0.925165963	4.44584	0.01975929	2744	
DKL	6%	3	0.630086313	4.44584	0.01975929	2060	
Mezcla	0%	1	16.48387097	2.87672	0.01955556	468	7.44933245
Mezcla	0%	1	15.17821782	1.76526	0.012	228	
Mezcla	0%	1	15.64285714	2.74596	0.01866667	220	
Mezcla	0%	1	17.42045455	2.2883	0.01555556	280	
Mezcla	0%	1	14.46226415	2.81134	0.01911111	392	
Mezcla	0%	1	16.30851064	2.54982	0.01733333	184	
Mezcla	0%	1	17.8255814	2.6152	0.01777778	164	
Mezcla	0%	1	19.1625	2.41906	0.01644444	156	
Mezcla	0%	1	18.92592593	2.6152	0.01777778	400	
Mezcla	0%	1	20.17105263	2.48444	0.01688889	316	

Mezcla	0%	2	13.81081081	3.269	0.02222222	392	8.68644856
Mezcla	0%	2	15.64285714	3.269	0.02222222	440	
Mezcla	0%	2	14.88349515	3.72666	0.02533333	136	
Mezcla	0%	2	14.46226415	3.269	0.02222222	296	
Mezcla	0%	2	16.48387097	2.54982	0.01733333	340	
Mezcla	0%	2	16.48387097	3.269	0.02222222	464	
Mezcla	0%	2	18.46987952	3.53052	0.024	228	
Mezcla	0%	2	15.64285714	2.68058	0.01822222	212	
Mezcla	0%	2	15.33	2.6152	0.01777778	136	
Mezcla	0%	2	14.88349515	2.74596	0.01866667	280	
Mezcla	0%	3	12.56557377	2.87672	0.01955556	320	9.68874821
Mezcla	0%	3	17.03333333	2.68058	0.01822222	392	
Mezcla	0%	3	15.64285714	3.269	0.02222222	500	
Mezcla	0%	3	17.03333333	2.6152	0.01777778	372	
Mezcla	0%	3	13.21551724	2.9421	0.02	232	
Mezcla	0%	3	15.64285714	2.9421	0.02	328	
Mezcla	0%	3	13.1025641	2.6152	0.01777778	600	
Mezcla	0%	3	15.96875	2.9421	0.02	252	
Mezcla	0%	3	14.19444444	3.13824	0.02133333	420	
Mezcla	0%	3	12.775	2.9421	0.02	488	
Mezcla	2%	1	4.246537396	3.39976	0.02311111	780	7.61883243
Mezcla	2%	1	3.32537961	3.39976	0.02311111	1560	
Mezcla	2%	1	4.702453988	3.39976	0.02311111	920	
Mezcla	2%	1	3.32537961	3.46514	0.02355556	760	
Mezcla	2%	1	4.92926045	3.5959	0.02444444	324	
Mezcla	2%	1	4.977272727	3.13824	0.02133333	1140	
Mezcla	2%	1	4.066312997	2.74596	0.01866667	1100	
Mezcla	2%	1	5.07615894	3.269	0.02222222	368	

Mezcla	2%	1	3.900763359	3.79204	0.02577778	800	
Mezcla	2%	1	4.603603604	3.269	0.02222222	440	
Mezcla	2%	2	6.551282051	3.269	0.02222222	1220	6.0900612
Mezcla	2%	2	6.083333333	3.33438	0.02266667	788	
Mezcla	2%	2	6.936651584	2.81134	0.01911111	212	
Mezcla	2%	2	6.156626506	3.66128	0.02488889	576	
Mezcla	2%	2	6.874439462	3.269	0.02222222	1168	
Mezcla	2%	2	6.813333333	3.269	0.02222222	780	
Mezcla	2%	2	5.341463415	3.5959	0.02444444	860	
Mezcla	2%	2	6.441176471	3.39976	0.02311111	920	
Mezcla	2%	2	6.156626506	3.13824	0.02133333	1568	
Mezcla	2%	2	7.231132075	3.66128	0.02488889	968	
Mezcla	2%	3	4.673780488	3.5959	0.02444444	1552	5.77954834
Mezcla	2%	3	5.144295302	2.74596	0.01866667	336	
Mezcla	2%	3	5.341463415	3.53052	0.024	1320	
Mezcla	2%	3	5.322916667	3.72666	0.02533333	1192	
Mezcla	2%	3	5.196610169	3.5959	0.02444444	984	
Mezcla	2%	3	3.96124031	3.72666	0.02533333	816	
Mezcla	2%	3	4.109919571	3.5959	0.02444444	460	
Mezcla	2%	3	5.144295302	3.5959	0.02444444	620	
Mezcla	2%	3	5.059405941	3.72666	0.02533333	1340	
Mezcla	2%	3	4.430635838	3.66128	0.02488889	1220	
Mezcla	4%	1	4.088	3.85742	0.02622222	780	5.65184572
Mezcla	4%	1	4.508823529	3.66128	0.02488889	208	
Mezcla	4%	1	4.177111717	3.53052	0.024	2368	
Mezcla	4%	1	4.270194986	3.269	0.02222222	2616	
Mezcla	4%	1	5.656826568	2.54982	0.01733333	2112	
Mezcla	4%	1	5.36013986	3.53052	0.024	1100	

Mezcla	4%	1	3.920716113	3.9228	0.02666667	720	
Mezcla	4%	1	4.522123894	3.39976	0.02311111	1140	
Mezcla	4%	1	3.851758794	3.72666	0.02533333	980	
Mezcla	4%	1	4.913461538	3.5959	0.02444444	260	
Mezcla	4%	2	3.822942643	4.5766	0.03111111	2180	5.9372076
Mezcla	4%	2	4.775700935	3.9228	0.02666667	1912	
Mezcla	4%	2	5.436170213	4.44584	0.03022222	2060	
Mezcla	4%	2	4.673780488	3.5959	0.02444444	560	
Mezcla	4%	2	4.342776204	3.79204	0.02577778	1392	
Mezcla	4%	2	4.805642633	3.9228	0.02666667	1308	
Mezcla	4%	2	4.211538462	3.9228	0.02666667	960	
Mezcla	4%	2	4.143243243	4.11894	0.028	1304	
Mezcla	4%	2	4.270194986	3.9228	0.02666667	184	
Mezcla	4%	2	6.308641975	3.9228	0.02666667	1220	
Mezcla	4%	3	3.311015119	4.2497	0.02888889	1740	5.64060839
Mezcla	4%	3	3.748166259	4.18432	0.02844444	1312	
Mezcla	4%	3	4.576119403	4.11894	0.028	2208	
Mezcla	4%	3	3.951030928	4.11894	0.028	456	
Mezcla	4%	3	3.971502591	3.85742	0.02622222	1352	
Mezcla	4%	3	3.573426573	3.66128	0.02488889	760	
Mezcla	4%	3	3.940874036	3.98818	0.02711111	1464	
Mezcla	4%	3	4.405172414	3.9228	0.02666667	880	
Mezcla	4%	3	3.234177215	4.05356	0.02755556	1088	
Mezcla	4%	3	3.757352941	4.2497	0.02888889	1800	
Mezcla	6%	1	3.187110187	4.05356	0.01801582	2768	6.01250921
Mezcla	6%	1	2.965183752	3.85742	0.01714409	3020	
Mezcla	6%	1	3.109533469	3.9228	0.01743467	320	
Mezcla	6%	1	3.38410596	3.98818	0.01772524	1744	

Mezcla	6%	1	4.211538462	3.79204	0.01685351	2860	
Mezcla	6%	1	3.282655246	4.11894	0.0183064	2013	
Mezcla	6%	1	3.122199593	4.18432	0.01859698	1720	
Mezcla	6%	1	2.713274336	3.9228	0.01743467	472	
Mezcla	6%	1	2.965183752	3.46514	0.01540062	2860	
Mezcla	6%	1	3.96124031	3.85742	0.01714409	2352	
Mezcla	6%	2	4.2	4.18432	0.02844444	2952	6.62232323
Mezcla	6%	2	5.455516014	4.11894	0.028	1869	
Mezcla	6%	2	3.794554455	3.9228	0.02666667	1920	
Mezcla	6%	2	3.910714286	4.11894	0.028	2460	
Mezcla	6%	2	3.785185185	3.85742	0.02622222	1600	
Mezcla	6%	2	3.035643564	3.9228	0.02666667	1888	
Mezcla	6%	2	5.11	3.85742	0.02622222	1240	
Mezcla	6%	2	2.865420561	4.2497	0.02888889	2020	
Mezcla	6%	2	3.406666667	4.18432	0.02844444	1980	
Mezcla	6%	2	3.524137931	4.31508	0.02933333	760	
Mezcla	6%	3	3.910714286	3.98818	0.02711111	2520	6.28995977
Mezcla	6%	3	3.339869281	4.31508	0.02933333	1700	
Mezcla	6%	3	2.988304094	3.53052	0.024	2860	
Mezcla	6%	3	2.876172608	4.5766	0.03111111	920	
Mezcla	6%	3	4.92926045	3.72666	0.02533333	1640	
Mezcla	6%	3	3.414253898	3.9228	0.02666667	1820	
Mezcla	6%	3	4.731481481	3.66128	0.02488889	1200	
Mezcla	6%	3	3.078313253	4.2497	0.02888889	1960	
Mezcla	6%	3	3.39159292	4.05356	0.02755556	420	
<b>Mezcla</b>	<b>6%</b>	<b>3</b>	<b>3.066</b>	<b>3.9228</b>	<b>0.02666667</b>	<b>2060</b>	

**Anexo 3:** Análisis estadístico de la permeabilidad Gurley.

<b>Papel</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Repetición</b>	<b>Q1</b>	<b>median</b>	<b>Q3</b>	<b>mean</b>	<b>CV%</b>	<b>n</b>
Bambú	0%	1	90.18	90.18	90.18	90.49	6.28	10
Bambú	0%	2	97.41	102.20	102.20	101.29	7.10	10
Bambú	0%	3	80.68	80.68	85.17	81.87	9.98	10
Bambú	2%	1	32.11	33.34	38.61	35.31	14.44	10
Bambú	2%	2	34.26	36.52	40.34	36.67	17.93	10
Bambú	2%	3	32.98	34.84	38.83	36.04	11.08	10
Bambú	4%	1	37.39	39.31	41.43	39.30	11.27	10
Bambú	4%	2	34.68	36.50	39.60	37.03	11.53	10
Bambú	4%	3	37.62	38.82	40.08	38.68	12.70	10
Bambú	6%	1	44.12	45.09	47.54	49.78	29.15	10
Bambú	6%	2	53.33	55.76	61.32	57.18	13.81	10
Bambú	6%	3	49.45	51.10	55.80	53.22	11.21	10
DKL	0%	1	7.28	8.36	9.82	8.54	16.93	10
DKL	0%	2	7.56	8.25	8.79	8.66	20.91	10
DKL	0%	3	7.94	8.56	9.18	8.70	15.01	10
DKL	2%	1	0.44	0.50	0.56	0.50	12.46	10
DKL	2%	2	0.69	0.80	0.83	0.80	28.31	10
DKL	2%	3	0.63	0.74	0.97	0.98	71.98	10
DKL	4%	1	0.54	0.57	0.68	0.60	18.84	10
DKL	4%	2	0.54	0.64	0.69	0.65	28.01	10
DKL	4%	3	0.66	0.77	0.85	0.78	22.96	10
DKL	6%	1	0.85	1.06	1.33	1.44	70.97	10
DKL	6%	2	0.41	0.47	0.53	0.46	15.93	10
DKL	6%	3	0.55	0.57	0.62	0.60	25.07	10
Mezcla	0%	1	15.81	16.95	18.65	17.16	10.89	10
Mezcla	0%	2	14.88	15.49	16.27	15.61	8.38	10
Mezcla	0%	3	13.13	14.92	15.89	14.72	11.89	10
Mezcla	2%	1	3.94	4.43	4.87	4.32	15.11	10
Mezcla	2%	2	6.16	6.50	6.86	6.46	8.49	10
Mezcla	2%	3	4.49	5.10	5.18	4.84	10.55	10
Mezcla	4%	1	4.11	4.39	4.82	4.53	13.43	10
Mezcla	4%	2	4.23	4.51	4.80	4.68	15.56	10
Mezcla	4%	3	3.62	3.85	3.97	3.85	11.08	10
Mezcla	6%	1	3.00	3.15	3.36	3.29	14.05	10
Mezcla	6%	2	3.44	3.79	4.13	3.91	21.23	10
Mezcla	6%	3	3.07	3.37	3.79	3.57	20.31	10

**Anexo 4:** Análisis estadístico de la resistencia a la tensión.

<b>Papel</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Repetición</b>	<b>Q1</b>	<b>median</b>	<b>Q3</b>	<b>mean</b>	<b>CV%</b>	<b>n</b>
Bambú	0%	1	1.72	2.26	2.70	2.19	28.74	10
Bambú	0%	2	1.54	1.73	2.03	1.80	18.24	10
Bambú	0%	3	2.17	2.22	2.32	2.28	9.07	10
Bambú	2%	1	2.44	2.48	2.60	2.54	9.16	10
Bambú	2%	2	2.30	2.45	2.53	2.41	9.93	10
Bambú	2%	3	2.30	2.48	2.53	2.40	8.23	10
Bambú	4%	1	2.30	2.45	2.58	2.49	9.46	10
Bambú	4%	2	2.35	2.35	2.47	2.45	7.58	10
Bambú	4%	3	2.32	2.48	2.60	2.49	9.46	10
Bambú	6%	1	2.44	2.55	2.66	2.55	8.29	10
Bambú	6%	2	2.32	2.45	2.62	2.48	8.10	10
Bambú	6%	3	2.53	2.71	2.81	2.70	6.26	10
DKL	0%	1	3.27	3.33	3.47	3.38	8.31	10
DKL	0%	2	3.06	3.40	3.58	3.31	9.33	10
DKL	0%	3	3.02	3.47	3.66	3.33	11.58	10
DKL	2%	1	3.63	3.79	4.07	3.87	11.67	10
DKL	2%	2	3.53	3.76	3.97	3.71	9.35	10
DKL	2%	3	3.45	3.79	4.04	3.74	10.86	10
DKL	4%	1	3.55	3.76	3.92	3.84	10.38	10
DKL	4%	2	3.55	3.76	3.91	3.62	10.61	10
DKL	4%	3	3.81	3.92	4.14	3.92	9.56	10
DKL	6%	1	4.33	4.38	4.45	4.32	7.18	10
DKL	6%	2	4.07	4.28	4.53	4.28	8.77	10
DKL	6%	3	4.18	4.32	4.45	4.32	8.60	10
Mezcla	0%	1	2.44	2.58	2.71	2.52	12.68	10
Mezcla	0%	2	2.70	3.27	3.27	3.09	13.34	10
Mezcla	0%	3	2.73	2.94	2.94	2.90	7.38	10
Mezcla	2%	1	3.27	3.40	3.45	3.35	8.33	10
Mezcla	2%	2	3.27	3.30	3.55	3.34	7.80	10
Mezcla	2%	3	3.60	3.60	3.71	3.55	8.19	10
Mezcla	4%	1	3.43	3.56	3.71	3.50	11.10	10
Mezcla	4%	2	3.92	3.92	4.07	4.01	7.33	10
Mezcla	4%	3	3.94	4.09	4.17	4.04	4.63	10
Mezcla	6%	1	3.86	3.92	4.04	3.92	5.13	10
Mezcla	6%	2	3.92	4.12	4.18	4.07	4.15	10
Mezcla	6%	3	3.78	3.96	4.20	3.99	8.00	10

**Anexo 5:** Análisis estadístico de la resistencia a la tracción.

<b>Papel</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Repetición</b>	<b>Q1</b>	<b>median</b>	<b>Q3</b>	<b>mean</b>	<b>CV%</b>	<b>n</b>
Bambú	0%	1	0.012	0.015	0.018	0.015	28.74	10
Bambú	0%	2	0.010	0.012	0.014	0.012	18.24	10
Bambú	0%	3	0.015	0.015	0.016	0.015	9.07	10
Bambú	2%	1	0.017	0.017	0.018	0.017	9.16	10
Bambú	2%	2	0.016	0.017	0.017	0.016	9.93	10
Bambú	2%	3	0.016	0.017	0.017	0.016	8.23	10
Bambú	4%	1	0.016	0.017	0.018	0.017	9.46	10
Bambú	4%	2	0.016	0.016	0.017	0.017	7.58	10
Bambú	4%	3	0.016	0.017	0.018	0.017	9.46	10
Bambú	6%	1	0.017	0.017	0.018	0.017	8.29	10
Bambú	6%	2	0.016	0.017	0.018	0.017	8.10	10
Bambú	6%	3	0.017	0.018	0.019	0.018	6.26	10
DKL	0%	1	0.022	0.023	0.024	0.023	8.31	10
DKL	0%	2	0.021	0.023	0.024	0.022	9.33	10
DKL	0%	3	0.021	0.024	0.025	0.023	11.58	10
DKL	2%	1	0.025	0.026	0.028	0.026	11.67	10
DKL	2%	2	0.024	0.026	0.027	0.025	9.35	10
DKL	2%	3	0.023	0.026	0.027	0.025	10.86	10
DKL	4%	1	0.024	0.026	0.027	0.026	10.38	10
DKL	4%	2	0.024	0.026	0.027	0.025	10.61	10
DKL	4%	3	0.026	0.027	0.028	0.027	9.56	10
DKL	6%	1	0.029	0.030	0.030	0.029	7.18	10
DKL	6%	2	0.028	0.029	0.031	0.029	8.77	10
DKL	6%	3	0.019	0.019	0.020	0.019	8.60	10
Mezcla	0%	1	0.017	0.018	0.018	0.017	12.68	10
Mezcla	0%	2	0.018	0.022	0.022	0.021	13.34	10
Mezcla	0%	3	0.019	0.020	0.020	0.020	7.38	10
Mezcla	2%	1	0.022	0.023	0.023	0.023	8.33	10
Mezcla	2%	2	0.022	0.022	0.024	0.023	7.80	10
Mezcla	2%	3	0.024	0.024	0.025	0.024	8.19	10
Mezcla	4%	1	0.023	0.024	0.025	0.024	11.10	10
Mezcla	4%	2	0.027	0.027	0.028	0.027	7.33	10
Mezcla	4%	3	0.027	0.028	0.028	0.027	4.63	10
Mezcla	6%	1	0.017	0.017	0.018	0.017	5.13	10
Mezcla	6%	2	0.027	0.028	0.028	0.028	4.15	10
Mezcla	6%	3	0.026	0.027	0.029	0.027	8.00	10

**Anexo 6:** Análisis estadístico de la resistencia al rasgado.

<b>Papel</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Repetición</b>	<b>Observación</b>	<b>n</b>
Bambú	0%	1	10.47	1
Bambú	0%	2	9.44	1
Bambú	0%	3	9.71	1
Bambú	2%	1	9.25	1
Bambú	2%	2	9.66	1
Bambú	2%	3	9.74	1
Bambú	4%	1	8.77	1
Bambú	4%	2	8.70	1
Bambú	4%	3	7.39	1
Bambú	6%	1	6.88	1
Bambú	6%	2	8.11	1
Bambú	6%	3	7.48	1
DKL	0%	1	14.44	1
DKL	0%	2	6.60	1
DKL	0%	3	7.19	1
DKL	2%	1	5.08	1
DKL	2%	2	4.93	1
DKL	2%	3	4.63	1
DKL	4%	1	4.83	1
DKL	4%	2	4.48	1
DKL	4%	3	4.44	1
DKL	6%	1	4.48	1
DKL	6%	2	4.44	1
DKL	6%	3	4.49	1
Mezcla	0%	1	7.45	1
Mezcla	0%	2	8.69	1
Mezcla	0%	3	9.69	1
Mezcla	2%	1	7.62	1
Mezcla	2%	2	6.09	1
Mezcla	2%	3	5.78	1
Mezcla	4%	1	5.65	1
Mezcla	4%	2	5.94	1
Mezcla	4%	3	5.64	1
Mezcla	6%	1	6.01	1
Mezcla	6%	2	6.62	1
Mezcla	6%	3	6.29	1

**Anexo 7:** Análisis estadístico de la resistencia al plegado.

<b>Papel</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Repetición</b>	<b>Q1</b>	<b>median</b>	<b>Q3</b>	<b>mean</b>	<b>CV%</b>	<b>n</b>
Bambú	0%	1	20.0	22.0	24.0	22.4	25.5	10
Bambú	0%	2	17.0	20.0	20.0	22.0	35.6	10
Bambú	0%	3	21.0	24.0	37.0	28.4	36.6	10
Bambú	2%	1	101.0	130.0	150.0	124.4	26.1	10
Bambú	2%	2	65.0	76.0	95.0	88.4	47.3	10
Bambú	2%	3	61.0	66.0	89.0	84.4	49.0	10
Bambú	4%	1	104.0	126.0	142.0	136.4	51.3	10
Bambú	4%	2	68.0	90.0	103.0	87.6	27.8	10
Bambú	4%	3	69.0	96.0	141.0	116.4	58.2	10
Bambú	6%	1	67.0	80.0	87.0	86.4	51.0	10
Bambú	6%	2	64.0	78.0	86.0	91.2	55.5	10
Bambú	6%	3	82.0	120.0	147.0	131.2	45.2	10
DKL	0%	1	1195.8	1887.0	2571.6	1887.0	41.0	10
DKL	0%	2	1830.0	2000.0	2360.0	2384.0	47.8	10
DKL	0%	3	2122.0	2416.0	2645.0	2572.8	33.3	10
DKL	2%	1	2908.0	3268.0	3439.0	3108.0	15.2	10
DKL	2%	2	1515.0	1910.0	3342.0	2716.0	67.8	10
DKL	2%	3	2373.0	2444.0	2844.0	2473.2	21.6	10
DKL	4%	1	1949.0	2287.5	2940.0	2302.7	44.6	10
DKL	4%	2	1745.0	2320.0	2815.0	2173.2	47.8	10
DKL	4%	3	1850.0	2196.0	2235.0	2174.4	34.5	10
DKL	6%	1	2245.0	2904.0	3864.0	3280.8	37.0	10
DKL	6%	2	1770.0	2828.0	3559.0	2647.2	45.4	10
DKL	6%	3	1430.0	2300.0	2736.0	2456.4	53.1	10
Mezcla	0%	1	193.0	254.0	373.0	280.8	39.0	10
Mezcla	0%	2	216.0	288.0	379.0	292.4	40.0	10
Mezcla	0%	3	322.0	382.0	471.0	390.4	29.6	10
Mezcla	2%	1	520.0	790.0	1055.0	819.2	47.1	10
Mezcla	2%	2	782.0	890.0	1118.0	906.0	40.8	10
Mezcla	2%	3	669.0	1088.0	1295.0	984.0	41.7	10
Mezcla	4%	1	735.0	1040.0	1869.0	1228.4	69.3	10
Mezcla	4%	2	1025.0	1306.0	1782.0	1308.0	48.7	10
Mezcla	4%	3	932.0	1332.0	1671.0	1306.0	40.5	10
Mezcla	6%	1	1726.0	2182.5	2837.0	2012.9	48.4	10
Mezcla	6%	2	1667.3	1904.0	2010.0	1868.9	32.2	10
Mezcla	6%	3	1310.0	1760.0	2035.0	1710.0	42.4	10