



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# *Estudios de fuentes alternativas a la madera para la obtención de la celulosa*

---

**MEMORIA PRESENTADA POR:**

*Mehdi Dhia*

**TUTOR/A:**

*Juan López Martínez  
José Miguel Ferri Azor*

*Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de  
Materiales*

Convocatoria de defensa: Julio 2021

## **Resumen**

*Este trabajo se dedica a estudiar tres fuentes alternativas a la madera para la obtención de la celulosa que son bagazo de alcachofa (*Cynara scolymus*), tallo de malva (*Malva arborea*) y espiga de maíz (*Zea mays*). Se determina la composición y la estructura de cada fibra alternativa (TGA, composición química, FTIR, FESEM), también se integran como carga en el proceso de fabricación de papel artesanal y posteriormente se determina su caracterización mecánica mediante ensayo de tracción y desgarro. La comparación entre resultados obtenidos permitirá de concluir sobre el efecto y la posibilidad de integrar las fibras alternativas a la madera en el proceso de fabricación de papel y pulpa para disminuir el consumo de madera y valorizar residuos agrícolas y biomasa abundante.*

**Palabras claves:** Celulosa, fibras alternativas, alcachofa, maíz, malva, fabricación de papel, madera, FESEM, termogravimetría, caracterización mecánica, FTIR, método Chesson-Data.

## **Abstract**

*This work is dedicated to studying three alternative sources to wood for obtaining cellulose that are artichoke bagasse (*Cynara scolymus*), mauve stem (*Malva arborea*) and corn spike (*Zea mays*). The composition and structure of each alternative fiber are determined with several technics (Thermogravimetric method, chemical composition, FTIR, FESEM) they are also integrated as a load in the process of handmade paper and subsequently its mechanical characterization is determined through tensile and tearing test. The comparison between results obtained will allow to conclude on the effect and the possibility of integrating the non-wood fiber in the process of manufacture of paper and pulp to reduce the consumption of wood and valorize agricultural waste and abundant biomass.*

**Keywords:** non-wood fiber, cellulose, artichoke, corn, mauve, papermaking, wood, FTIR, thermogravimetric analysis, mechanical characterization, FESEM, Chesson-Data method.



# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Estado de arte .....</b>	<b>14</b>
<u>2.1. Material lignocelulósico .....</u>	14
<u>2.2. Las fibras celulósicas.....</u>	15
<u>2.3. La lignina.....</u>	17
<u>2.4. Hemicelulosa .....</u>	18
<u>2.5. Aplicación de la celulosa.....</u>	18
<u>2.6. Papel y pulpa .....</u>	19
<u>2.7. Fabricación de la pulpa.....</u>	19
<u>2.8. Problemas medioambientales: El impacto y el desafío .....</u>	24
<u>2.9. Fibras alternativas.....</u>	25
<u>2.10. Características de las fibras alternativas .....</u>	26
<u>2.11. Fibras alternativas en la industria de papel .....</u>	28
<u>2.12. Ventajas y desventajas del uso de fibra alternativa a la madera para la fabricación de papel.....</u>	32
<b>3. Objetivos: .....</b>	<b>35</b>
<b>4. Materiales y métodos .....</b>	<b>37</b>
<u>4.1. Preparación de la carga.....</u>	37
<u>4.2. Caracterización de las fibras.....</u>	39
<u>4.2.1. Análisis termogravimétrico.....</u>	39
<u>4.2.2. Espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) .....</u>	40
<u>4.3. Análisis morfológico .....</u>	41
<u>4.4. Análisis de la composición química .....</u>	41
<u>4.5. Preparación de las muestras de papel .....</u>	44



\_\_4.6. Caracterización del papel acabado ..... 46

**5. Resultados ..... 49**

\_\_5.1. TGA y Composiciones químicas de las cargas ..... 49

\_\_5.2. Análisis FTIR ..... 52

\_\_5.3. Estudio morfológico ..... 55

\_\_5.4. Caracterización mecánica ..... 57

\_\_5.4.1. Tracción ..... 57

\_\_5.4.2. Desgarro ..... 59

**6. Conclusión..... 61**

**7. Referencias bibliográficas..... 63**

## Índice de Tablas

Tabla 1: Características mecánicas de papel mojado con matriz de fibras alternativas(Liu et al., 2018)	29
Tabla 2: tabla recapitulativa de la resistencia a la tracción de fibras no maderosa (Abd El-Sayed et al., 2020; Letter, n.d.; Liu et al., 2018; Pennells et al., 2020)	31
Tabla 3: tabla comparativa entre la madera y la fibra alternativa en el proceso de fabricación de papel y pulpa (Bajpai, 2021a)	33
Tabla 4: características generales de la materia prima utilizada	37
Tabla 5: resistencia máxima y el módulo de elasticidad de las probetas analizadas	58
Tabla 6: Resultados del ensayo de desgarro	59

## Índice de figuras

Figura 1: Consumo de papel y cartón en determinados países de todo el mundo 2018 (Paper and Paperboard Consumption by Country Worldwide 2018   Statista, 2020) _	11
Figura 2: Estructura de las fibras lignocelulósica (Doherty et al., 2011) _____	14
Figura 3: (a) Estructura química de la cadena de celulosa y (b) representación de algunos enlaces de hidrógeno entre dos cadenas de celulosa.(le Gars et al., 2020) ____	16
Figura 4: Esquemización de una composición simplificada de fibra de celulosa (a) y disposiciones de dominios cristalinos y amorfos en fibra de celulosa (b).(Capron et al., 2017)_____	17
Figura 5: Monómeros alcoholos de la lignina: (a) alcohol p-Coumaryl (4-hidroxilo fenilo, H), (b) alcohol coniferyl (guaiacyl, G), (c) alcohol sinapilo (siringilo, S) ____	17
Figura 6: Esquema de procesos de fabricación de la pasta de papel _____	20
Figura 7: Proceso de fabricación mecánica _____	20
Figura 8: Esquemización del proceso de fabricación de papel _____	22
Figura 9: (a) trituradora industrial (b) micronizadora 250µm _____	38
Figura 10: esquema de termobalanza y su principio de funcionamiento _____	39
Figura 11: Linseis THERMAL ANALYSIS _____	39
Figura 12: Perkin Elmer® FTIR-ATR _____	40
Figura 13: ZEISS ULTRA 55 Oxford Instrument ® _____	41
Figura 14: Preparación de las muestras _____	42
Figura 15: (a) muestras en ebullición en agua (b) etapa de filtración _____	42
Figura 16: etapa de estabilización de la masa _____	43
Figura 17: (a) precipitado obtenido después el ataque acido a 72% (b) montaje a reflujo (c) muestra deslignificada _____	43
Figura 18: material utilizado para la fabricación artesanal del papel _____	44
Figura 19: Ibertest® DUOTRAC-10/1200-400 _____	46
Figura 20: Probetas de tracción _____	47
Figura 21: Probetas del ensayo de desgarro _____	47
Figura 22: análisis térmico TGA y química de una muestra de alcachofa M1 _____	49
Figura 23:: análisis térmico TGA y químico de una muestra de malva M2 _____	50
Figura 24: análisis térmico TGA y químico de una muestra de maíz M3 _____	51
Figura 25: espectrofotómetro FTIR de la muestra de la malva _____	52

Figura 26: FTIR de la muestra de alcachofa_____	53
Figura 27: FTIR muestra maíz _____	54
Figura 28: Vista transversal del bagazo de alcachofa a 75X aumento (imagen a) e a 770 aumento (imagen b) _____	55
Figura 29: Corte longitudinal de un tronco de malva (X 250 aumentos)_____	55
Figura 30:FESEM de mazorca de maíz a x866 aumento (imagen a) y a x445 aumento (imagen b)_____	57
Figura 31: Representación gráfica de la resistencia máxima obtenida a tracción para las probetas de cartón_____	58
Figura 32: Representación de la fuerza máxima y la fuerza media obtenido por el ensayo de desgarro _____	59



# Introducción

INTRODUCCIÓ

## 1. Introducción

La principal fuente de fibra celulósica utilizada para la producción de pulpa y papel proviene de la madera y representa aproximadamente el 90 % de la materia prima convencional utilizada por la industria de papel en el mundo. Sin embargo, el agotamiento de los bosques para obtener la madera ha hecho un impacto en el medio ambiente. A medida que este problema se convierte en crucial, las fibras alternativas de fuentes no madera proporcionarán una buena solución para limitar la destrucción del medio ambiente.(Rullifank et al., 2020)

El papel como necesidad humana básica ha ayudado a transformar la sociedad tal como la conocemos hoy en día. El papel en todas sus formas y aplicaciones representa una solución sostenible y renovable que sirve a muchos usos ingeniosos. Desde la moneda hasta la lectura y la escritura de la comunicación a la salud, la higiene y los usos industriales, el papel proporciona una utilidad esencial para la sociedad moderna(Biermann, 1996c).

El consumo del papel sigue siendo importante en la era digital, con este material omnipresente todavía utilizado diariamente para muchos propósitos en todo el mundo. De hecho, la producción mundial de papel y cartón asciende a más de 400 millones de toneladas métricas cada año. El tipo de papel más producido es el embalaje de papel y cartón, que ha ido creciendo su demanda en los últimos años debido al auge de las compras en línea. Los dos países productores de papel más grandes del mundo son China y Estados Unidos. Si bien la producción de papel en los Estados Unidos ha estado disminuyendo, la producción en China ha aumentado significativamente en la última década.(Alén, 2019)

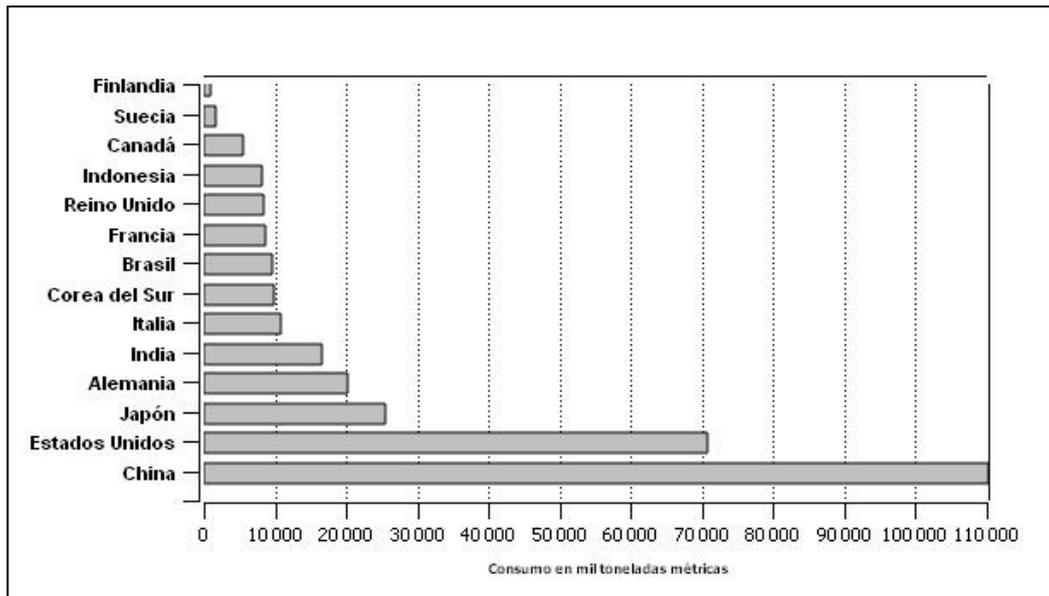


Figura 1: Consumo de papel y cartón en determinados países de todo el mundo 2018 (Paper and Paperboard Consumption by Country Worldwide 2018 | Statista, 2020)

Por otro lado, la situación de la industria gráfica y del papel, tradicionalmente ubicadas en Estados Unidos, Canadá y el norte de Europa, es muy delicada y las dificultades aumentan. Las nuevas regulaciones legislativas promulgadas en respuesta a la demanda de ambientalistas, grupos de personas y organizaciones no gubernamentales (ONG) en varios países restringen la tala de árboles, lo que se espera que afecte la oferta y el precio de la madera a la industria internacional de la pulpa y el papel. De hecho, las reubicaciones continúan actualmente, no sólo a Asia, sino también a América del Sur y dentro de la propia Europa. Los campos forestales tradicionales están siendo duramente golpeados por la creciente competencia de los países emergentes, los bosques están disminuyendo a un ritmo alarmante de 13,0 millones de hectáreas al año en los países en desarrollo. (Rousu et al., 2002) También el proceso de fabricación de papel tiene un alto impacto sobre el medioambiente por la utilización de productos de blanqueamiento para la madera que son difíciles de tratar y de eliminar, de esto la industria de papel está considerada una de las industrias más contaminante en el mundo. (Marrakchi et al., 2011)

Estos eventos están, por supuesto, relacionado con la posibilidad de hacer papel a partir de diferentes especies vegetales lignocelulósicos y que no son madera, algunas de las cuales tienen condiciones de cultivo ventajosas en algunas partes del mundo, y la proximidad de los consumidores. Otra providencia de las fibras que son los residuos

agrícolas que permite la disminución de los residuos sólidos e incrementar una economía circular para la sostenibilidad del sector de papel. Varias fábricas industriales exitosas basadas en materias primas alternativas para la producción de pulpa y papel ya existen hoy en día. La lignocelulosa es el principal componente estructural de las plantas y es, con diferencia, el tipo más abundante de biomasa terrenal. Consiste principalmente en celulosa (40-60%), hemicelulosa (10-40%) y lignina (15-30%), con cantidades menores de extractos, proteínas y compuestos inorgánicos (Abd El-Sayed et al., 2020; Saeed et al., 2018).

Por lo tanto, el desarrollo y la producción de nuevos materiales de alto valor añadido son importantes para la supervivencia de estas industrias. La aparición y el entusiasmo de las nanociencias y la nanotecnología está abriendo la puerta a nuevos nichos de mercado para el sector forestal, particularmente al permitir la creación de nuevos materiales y dispositivos. (Bajpai, 2021b)

En este trabajo se estudian las alternativas que permiten la reducción del uso de la madera en las industrias de papel y pulpas presentando nuevas fuentes de fibras lignocelulósicas de origen vegetal abundante o provenientes del postconsumo. A lo largo de este informe se habla, en la parte de introducción, de la celulosa, sus características y el uso de esta fibra como materia prima en la fabricación de papel. También presentamos las alternativas existentes para sustituir la madera como fuente de celulosa, mientras exponemos las tres especies elegidas, según su abundancia, para este estudio que son:

- Espiga de Maíz (*Zea mays*)
- Bagazo de Alcachofa (*Cynara scolymus*)
- Tronco de Malva (*Malva arborea*)

Estas especies, mencionadas anteriormente, han sido estudiadas y caracterizadas a lo largo de la parte práctica de este trabajo y luego se añadirán en el proceso de fabricación de papel para concluir sobre el efecto y la eficacia de estas fuentes de celulosa con el fin de reemplazar la madera en la industria del papel y disminuir el uso intensivo de los árboles en este sector.



# Estado de arte

Estado de arte

## 2. Estado de arte

### 2.1. Material lignocelulósico

Los materiales lignocelulósicos se refieren a plantas compuestas de celulosa, hemicelulosa y lignina. La microfibrilla de celulosa (formado por cadenas de polímeros ordenadas que contienen regiones cristalinas estrechamente empaquetadas) están incrustados dentro de una matriz de hemicelulosa y lignina (Doherty et al., 2011). Se ha comprobado que las uniones covalentes entre la lignina y los carbohidratos consisten en ésteres de bencilo, éteres de bencilo y glucósidos de fenilo. La biomasa lignocelulósica es la más abundante en la naturaleza y está presente en la madera dura, madera suave, residuos agroindustriales y vegetación. Los residuos lignocelulósicos producidos anualmente a nivel mundial exceden los 220 billones de toneladas, equivalentes a 60-80 billones de toneladas de crudo.

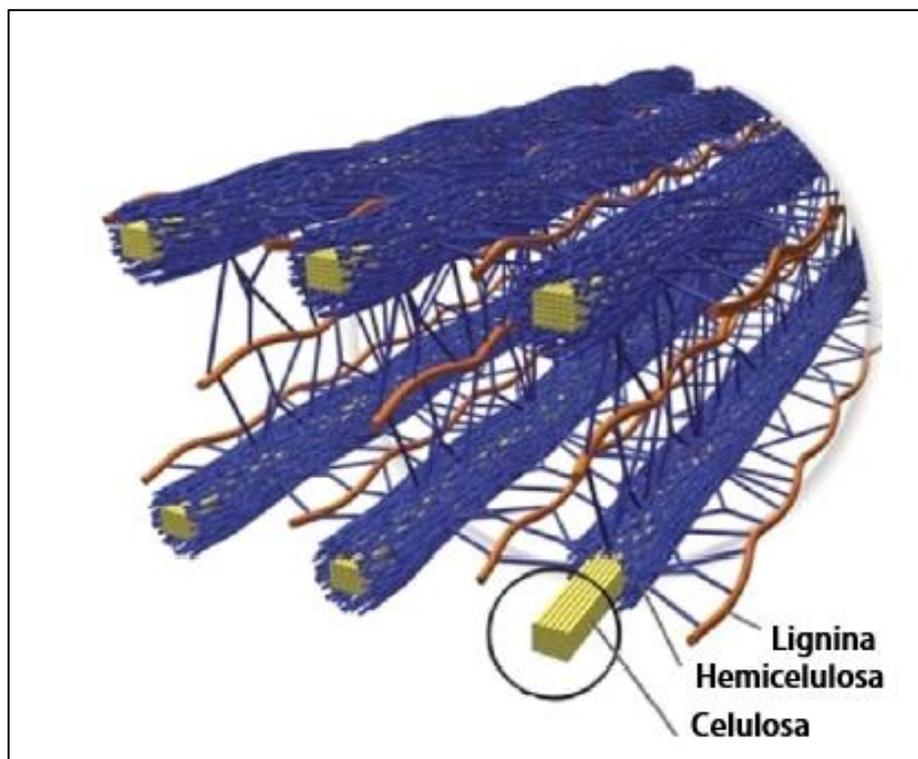


Figura 2: Estructura de las fibras lignocelulósica (Doherty et al., 2011)

Entre los diferentes materiales compuestos, los compuestos poliméricos lignocelulósicos tienen un futuro brillante para varias aplicaciones debido a su bajo impacto en el medio ambiente y otras ventajas. La utilización efectiva de diferentes fibras lignocelulósicas como uno de los componentes de los compuestos poliméricos tiene un inmenso margen para el desarrollo futuro en este campo. Para el desarrollo exitoso de compuestos avanzados de bajo costo de diferentes materiales lignocelulósicos, la investigación exhaustiva sobre cómo superar los inconvenientes de los compuestos poliméricos lignocelulósicos, junto con la búsqueda de nuevas rutas para utilizar eficazmente estos compuestos, es de suma importancia.(Thakur, 2014)

## **2.2.Las fibras celulósicas**

La celulosa se puede extraer de una gran variedad de fuentes, madera, fibras de semillas, fibra de lóber (lino, yute, ramio), algunas especies animales (tunicados), hongos y frutas, con diferentes contenidos de celulosa(Varshney & Naithani, 2011) Con más de  $10^{11}$  toneladas de celulosa producidas cada año (Suhas et al., 2016), menos del 5% se extrae para aplicaciones en el campo de materiales, la celulosa es el polímero más abundante de nuestro planeta (Klemm et al., 2005).

Después de casi 200 años de extracción, modificación y uso industrial de celulosa, este polímero sostenible y biodegradable se utiliza actualmente para varias aplicaciones, desde papel y cartón hasta biomédicos, edificios, textiles, cosméticos, farmacia y compuestos (Habibi, 2014). De hecho, las propiedades intrínsecas de las fibras de celulosa; abundancia, renovabilidad, y disponibilidad; así como su estructura fibrilar o propiedades mecánicas (resistencia, flexibilidad) los convierten en materiales de elección para tales aplicaciones. De hecho, en su forma natural, las fibras de celulosa se incluyen en la hemicelulosa y matriz a base de lignina como compuesto natural y actúa como el compuesto primario de las paredes de células vegetales proporcionando altas propiedades mecánicas y manteniendo su estructura (Habibi, 2014; Klemm et al., 2018).

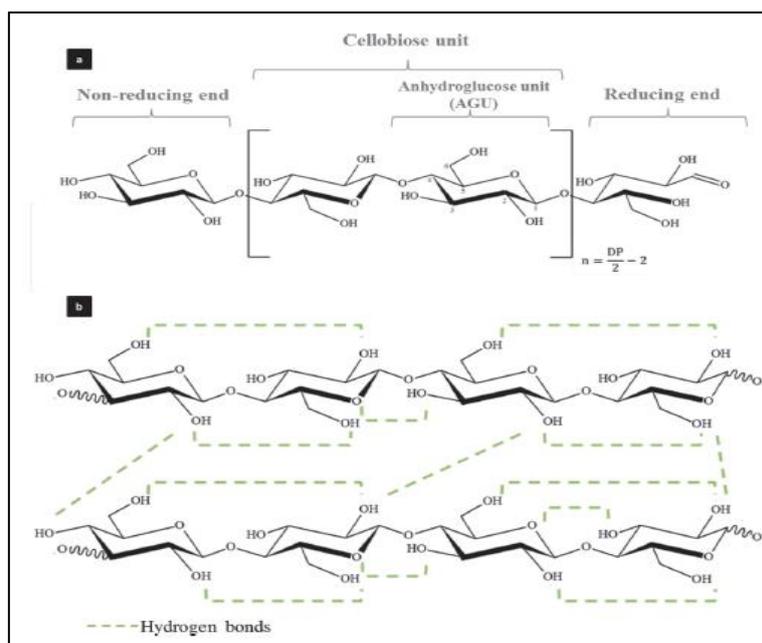


Figura 3: (a) Estructura química de la cadena de celulosa y (b) representación de algunos enlaces de hidrógeno entre dos cadenas de celulosa. (le Gars et al., 2020)

Forma parte de la estructura química de la celulosa, se trata de un homopolímero lineal constituido por monómeros de  $\beta$ -D-glucopiranososa ( $C_6H_{12}O_6$ ). Estas entidades de anhidro-D-glucosa (AGU) están unidas por enlaces de tipo  $\beta(1,4)$ -glucosídica, una unión covalente entre el grupo en posición ecuatorial OH en el átomo de carbono C4 y C1 de la siguiente unidad. Cada unidad gira  $180^\circ$  con respecto a su entorno circundante y está en conformación de sillas, con los tres grupos hidroxilos en posición ecuatorial. La celobiosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) que es la combinación de dos unidades anhidogluosas (AGU), es la unidad repetida de la celulosa. (le Gars et al., 2020) La Ilustración 3 presenta la estructura química de la celulosa y los tipos de enlaces entre monómeros.

Los grupos finales del polímero de celulosa son químicamente diferentes: un extremo no reductor y un grupo de aldehído reductor. Tenga en cuenta que el grado de polimerización (GP) se expresa en función del número de unidad AGU y depende de la fuente de celulosa y el proceso de aislamiento (por ejemplo, DP entre 300 y 1700 para la pulpa de madera y 800–1000 para el algodón) (Klemm et al., 2005). Los numerosos grupos hidroxilos (tres por AGU) inducen una posible funcionalización de la celulosa, así como enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares dentro y entre las cadenas de celulosa. Estas interacciones forman filamentos de celulosa estabilizados y flexibles: las microfibrillas de celulosa (figura 2). (Capron et al., 2017)

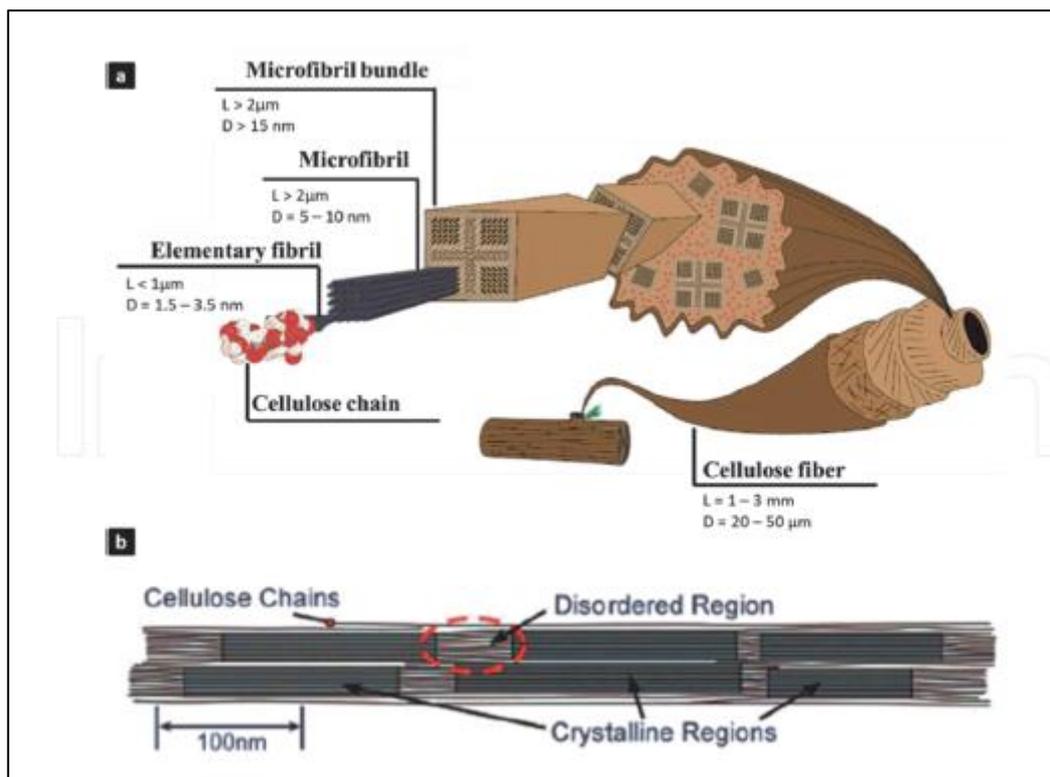


Figura 4: Esquematación de una composición simplificada de fibra de celulosa (a) y disposiciones de dominios cristalinos y amorfos en fibra de celulosa (b). (Capron et al., 2017)

### 2.3. La lignina

La estructura básica de la lignina consiste principalmente en tres monómeros alcoholes fenilpropanos, a saber, alcoholes cónicos, coniferílicos y sinálicos.

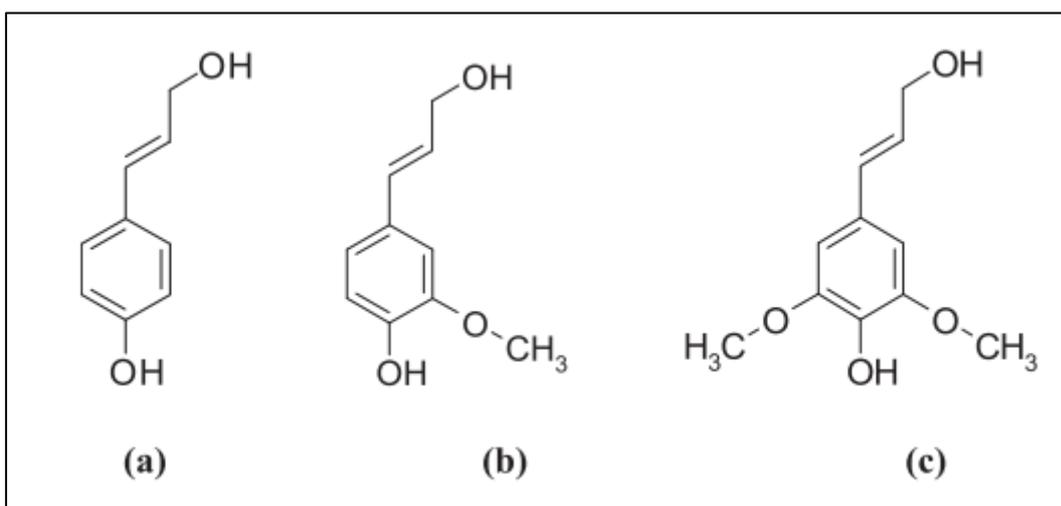


Figura 5: Monómeros alcoholes de la lignina: (a) alcohol *p*-Coumaryl (4-hidroxilo fenilo, H), (b) alcohol coniferyl (guaiacyl, G), (c) alcohol sinapilo (siringilo, S)

Es una macromolécula formada por polimerización oxidativa de monómeros de tipo fenilpropano. La lignina es el polímero natural más abundante del mundo después de

la celulosa. A nivel mundial, la producción anual de biomasa se estima en 172.000 millones de toneladas de materia seca, el equivalente a energía primaria de 15 veces la energía fósil consumida. (Kozlowski & Helwig, 1998; Mariano et al., 2014)

Las masas moleculares típicas de lignina aislada están en el rango 1000-20.000 g/mol, pero el grado de polimerización en la naturaleza es difícil de medir, ya que la lignina se fragmenta invariablemente durante la extracción y consiste en varios tipos de subestructuras que se repiten de una manera aparentemente azarosa. (Doherty et al., 2011; Gellerstedt & Henriksson, 2008)

## **2.4.Hemicelulosa**

Las hemicelulosas son un componente significativo de la pared de la célula vegetal. A diferencia de otros polisacáridos derivados de plantas como celulosa, almidón, pectinas y encías, las hemicelulosas no tienen un valor comercial comparable. (Gregory & Bolwell, 1999)

Las hemicelulosas, el segundo componente importante de la madera, también son polímeros de azúcar. A diferencia de la celulosa, que está hecha sólo de glucosa, las hemicelulosas consisten en glucosa y varios otros azúcares solubles en agua producidos durante la fotosíntesis. En las hemicelulosas el grado de polimerización es menor, se componen de moléculas más cortas que la celulosa. Representan entre el 20 y el 35% del peso seco de la madera. Hay muchas variedades de hemicelulosas y difieren notablemente en composición en maderas blandas y maderas duras. Generalmente, las hemicelulosas están en una proporción relativamente mayor en maderas duras que en maderas blandas. (Asif, 2009)

## **2.5.Aplicación de la celulosa**

La celulosa es el polímero orgánico más rico encontrado, ya que es un componente estructural importante de la pared celular primaria de plantas verdes, varias algas y oomycota. La celulosa se encuentra en grandes cantidades en materiales de uso frecuente como algodón (90%), madera (50%) y cáñamo seco (57%). Tiene numerosas aplicaciones en varios campos, pero se utiliza con mayor frecuencia en la fabricación de papel y cartón o en productos derivados como celofán y rayón. También es un componente importante de los textiles hechos de algodón o lino. Además, su uso se ve en la industria farmacéutica

como rellenos inactivos en medicamentos, en forma de celulosa en polvo y celulosa micro-cristalina.(Biermann, 1996a)

Una aplicación importante es la transformación de la celulosa en hoja: papel. Originalmente un producto raro y caro, hecho de cañamo y algodón en un procedimiento secreto, el periódico ha permanecido durante mucho tiempo como un artículo confidencial. Invasiones, que difunden conocimientos técnicos, el desarrollo del consumo en Europa Occidental, el uso de abundantes y económicas fuentes de materia prima (madera), los avances tecnológicos han aumentado la fabricación de papel al nivel de una gran industria a gran impacto.

## **2.6.Papel y pulpa**

La pulpa de papel se puede obtener de varias fuentes de materias primas: madera, plantas anuales, papeles recogidos. La fabricación de una pulpa consiste en disociar fibras celulósicas unas de otras sin degradarlas demasiado. Esta separación se puede llevar a cabo de diferentes maneras: ya sea mecánica o químicamente. En el caso del uso de papel recuperado, la pasta, conocida como desentinado, se obtiene a través de pasos de repulsión de los papeles y de eliminación de la tinta de este último.(Rullifank et al., 2020)

## **2.7.Fabricación de la pulpa**

La madera presenta una composición compleja, la celulosa es el elemento básico de la pared de las células. Unos elementos fundamentales aseguran la unión de las fibras que son principalmente la lignina el terpeno, la resina, fenoles y taninos. De esto, el proceso de producción de la celulosa consiste principalmente a separar las fibras celulósicas mecánicamente o por eliminación de la lignina por reacciones químicas.(Rullifank et al., 2020)

El primer paso consiste en quitar de forma mecánica la corteza de los troncos cosechados. La corteza reduciría la calidad del papel si se mantuviera en el proceso de fabricación de pasta. Esta parte quitada se aproveche como biocombustible.

La madera se muele para la obtención astillas de tamaño uniforme. Estas astillas se someten a los procesos de obtención de pulpa, ya sea en forma mecánica o químicas.

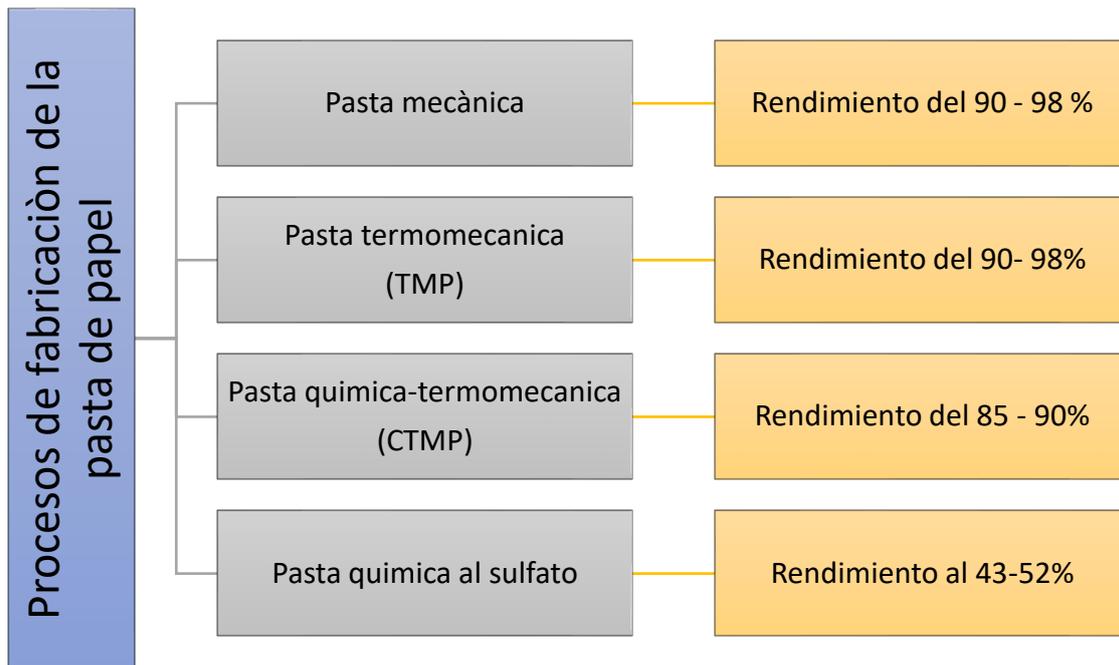


Figura 6: Esquema de procesos de fabricación de la pasta de papel

### **Pasta mecànica:**

Este método se considera el más antigua en la fabricación del papel. Una muela giratoria presiona los troncos descortezados y separa las fibras a través un proceso de arranque. En esta etapa se usa agua para facilitar el procedimiento y también para refrigerar la muela calentada por la fricción. La pasta pasa por unas finas cribas de manera dejan pasar las fibras quitándose todo material extraño como arena y polvo.(Muzzy et al., 1983)

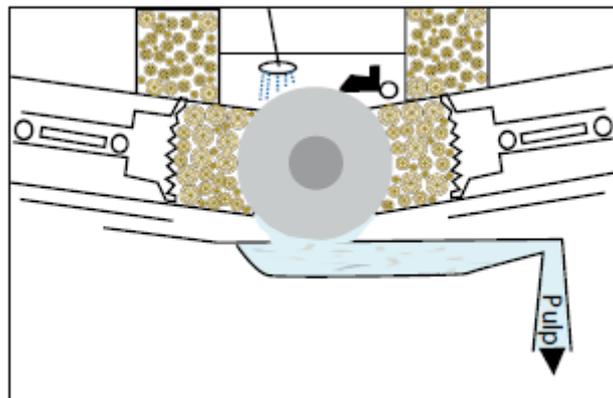


Figura 7: Proceso de fabricación mecànica

### **Pasta termo mecánica (TMP)**

Los troncos, cortados en astillas y lavadas para eliminar los restos de arenas y polvo, se calientan mediante vapor para ablandarlas y son introducidas con agua a presión en el refinador. El refinador tiene dos discos en contrarrotación y cada uno está equipado con canales radiales. Los mencionados canales van estrechándose conforme se aproximan al borde del disco. Las astillas reblandecidas son introducidas entonces por el centro y, gracias a la acción de los discos, se separan en fibras individuales al alcanzar el borde exterior de éstos. En la etapa de cribado, las fibras no desprendidas completamente se desechan e enviadas al refinador de desechos para un posterior tratamiento. (Marchessault et al., 1983)

### **Pasta química o pasta Kraft: Procedimiento al sulfato**

Como en el proceso TMP, los troncos son cortados y lavados antes de pasar a la etapa de fabricación de pasta.

Las astillas son introducidas en un recipiente de cocción llamado digestor. En este procedimiento se añaden productos químicos por la eliminación de la lignina. La temperatura del digestor se aumenta hasta 150-200°C. Después, la pasta se criba y se eliminan los haces de fibras que no se han separado. Las mayorías de las sustancias químicas utilizadas en este proceso serán recicladas para un posterior uso. Este procedimiento permite la producción de pulpa para papel fino y de impresión. (Rullifank et al., 2020)

### **Blanqueado de la pasta**

La blancura de la pasta de celulosa ha sido tradicionalmente vista como un índice de calidad y se mide por su capacidad para reflejar la luz monocromática comparándola con un estándar de óxido de magnesio. La pulpa resultante del proceso Kraft es generalmente marrón mientras la de los procesos sulfito es amarilla. Estos colores se deben a residuos de lignina que se adhieren a las fibras y que pueden ser eliminados o separados en procesos posteriores.

Durante el blanqueamiento de la pulpa los efluentes se producen como una compleja mezcla de compuestos en la que predominan los organoclorados, importantes agentes tóxicos. El cloro reacciona en primer lugar con la lignina residual para producir

aproximadamente 4 kg de organoclorados por tonelada de pulpa producida. La estimación a largo plazo indica que los efectos de las plantas tradicionales son mucho más importantes que los de aquellas que usan dióxido de cloro u ozono y peróxidos. Existen problemas adicionales en algunas plantas como la presencia de metales en los efluentes por el agregado de EDTA para solubilizar los cationes metálicos o de resinas y ácidos grasos que se liberan de las maderas procesadas.(Boeykens, 2006)

### Etapas de fabricación de papel

La fabricación de papel es esencialmente un proceso de filtración. De hecho, el lienzo de una máquina de papel puede considerarse un filtro continuo en el que se conservará la mayor parte de la proporción de sólidos de la masa. Los sólidos drenan a través de la lona con la mayoría del líquido para formar un líquido de aspecto lechoso, agua blanca. El agua blanca típica se compone de varios componentes como fibras, cargas finas y minerales, varios aditivos químicos necesarios para la fabricación (agente de retención y drenaje, biocidas, agente anti-espuma, etc.), así como materiales disueltos y coloidales (MDC) de pasos de fabricación anteriores.(Marrakchi et al., 2011)

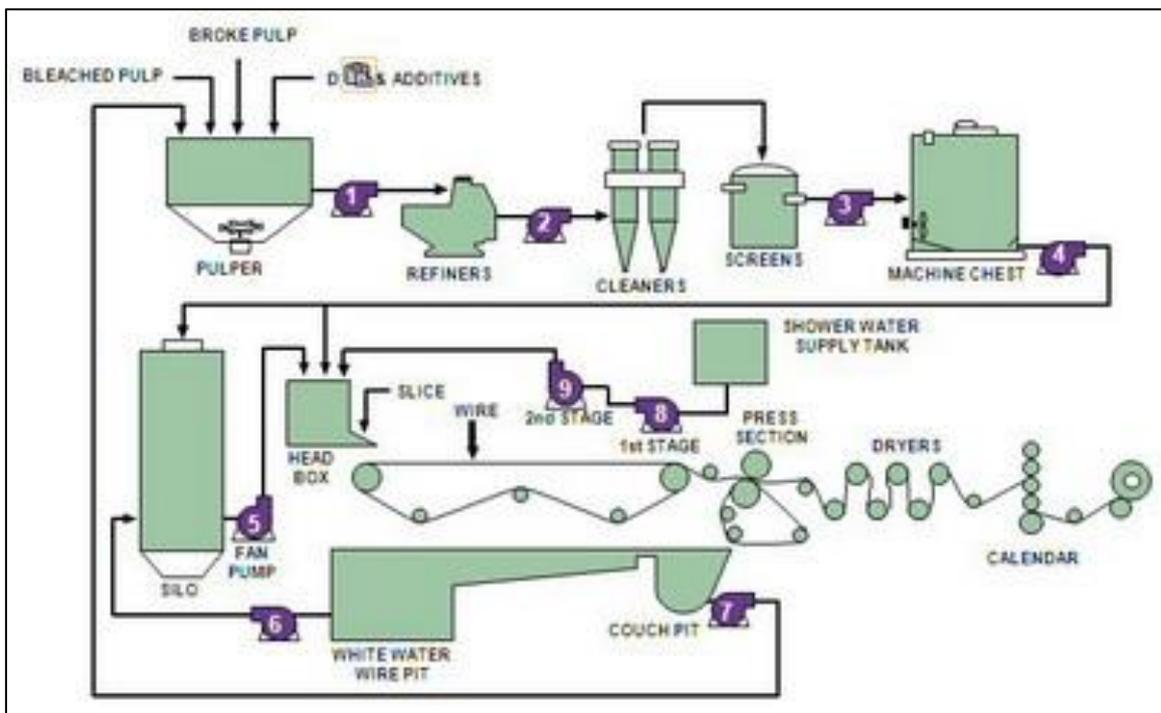


Figura 8: Esquematización del proceso de fabricación de papel

En términos generales, una máquina de papel convencional tiene tres secciones:

La primera sección es la sección de fabricación del colchón fibroso. Se forma en uno o más lienzos con la llegada de una suspensión diluida al 0,5% de consistencia a través de una máquina expendedora, la caja de admisión.

En la mesa plana, la masa se drena de su agua bajo fuertes turbulencias para salir de esta sección con una consistencia de alrededor del 20%. La calidad de la formación de hojas depende de esta turbulencia.(Goldstein, 1983)

Una adición de productos químicos, polímeros, puede ayudar con una buena formación de papel mediante el control del tamaño y la dispersión física de los flocos de fibra que lo componen. En esta etapa, también se añaden polímeros para ayudar a drenar el agua y retener sólidos en el lienzo aumentando la floculación de las fibras. Aumentar la cantidad de flocos promueve el flujo de agua y permite, a través de ellos, aumentar la cantidad de cargas minerales y finamente atrapados en la hoja de papel. (Lora, 2008)

El drenaje de agua también puede ser acelerado por varios elementos físicos como raspaduras y cajas de succión. Se basan, respectivamente, en un vacío hidrodinámico, creado por la velocidad del lienzo y en un vacío externo. El sistema de cajas de succión utiliza bombas de vacío que requieren una gran cantidad de agua para crear el vacío necesario que pudiera, en caso de defecto, estar contaminado con metales y aceites generados por la fricción de las piezas móviles.(Marchessault et al., 1983; Misko, 2012)

La segunda sección es la sección de prensa y su objetivo es eliminar la mayor cantidad de agua posible de la hoja presionando entre rodillos. El agua extraída en esta etapa permite de ahorrar energía y dinero y las etapas de secado. Por lo general, para un 1% adicional de la sequedad obtenida de las prensas, hay una reducción en el consumo de energía en la secadora de alrededor del 4%. El contenido sólido de la masa a la salida de la sección de prensa es de aproximadamente el 45%. La tercera sección es la sección de secado que evapora el resto del agua de la masa que ya no se puede quitar goteando o presionando. Evapora el agua a través del paso de la hoja en cilindros calentados por vapor, con el fin de llegar a una copia de aproximadamente el 95%.(Biermann, 1996b)

La fabricación de papel es un proceso que consume mucha agua, a menudo a expensas del rendimiento de la materia prima/papel. En los últimos años, los

principales esfuerzos técnicos han limitado el consumo a una media de 40m<sup>3</sup> por tonelada de papel fabricado.

A pesar de todos estos esfuerzos, la racionalización del consumo de agua dulce sigue siendo alta. Lo ideal sería ir por debajo de 10 m<sup>3</sup> por tonelada. Para lograr este objetivo de reducir el consumo, los circuitos de agua deben cerrarse al límite de lo que es posible. Este cierre se traduce en un aumento de la concentración de elementos finos (fibriles, cargas) del sistema de aguas blancas. Estos elementos finos de círculo redondo se enriquecen con materiales lipofílicos y cargas, reducen la capacidad de goteo del lienzo y dan papeles menos resistentes a las condiciones húmedas. Con el fin de evitar estos problemas, el papelerero trata de retener tantos elementos finos como sea posible en la hoja durante su formación evitando un drenaje brutal y si es necesario mediante el uso de agentes de retención. La mayoría de las plantas sólo aclaran la porción de agua blanca dirigida al circuito secundario, es decir, no utilizada para la dilución del circuito primario. Actualmente no existe tecnología (decantación, filtración) que pueda limpiar completamente el sistema de agua blanca de estos elementos finos para lograr un cierre completo. (Biermann, 1996d; Glesk, 1996)

## **2.8. Problemas medioambientales: El impacto y el desafío**

La mayor conciencia ecológica social ha provocado la disminución del consumo de los recursos naturales. El sector de la pulpa y el papel constituye un claro ejemplo de esta tendencia, como muestra su evolución hacia el uso de materias primas recicladas o alternativas y hacia un menor consumo de agua. Las acciones se deben centrar en el mejoramiento de la gestión del agua hasta llegar al equilibrio entre las necesidades de producción en fábrica y los requisitos medioambientales. Esto es realizar un eficiente tratamiento de los efluentes. (Kozlowski & Helwig, 1998)

Las aguas residuales de las productoras de pulpa para celulosa se tratan en lagunas o en plantas de barros activados. En el proceso de lagunas aireadas se llega a generar entre 0 y 5 kg de sólidos por tonelada de pulpa tratada que contiene entre 2 y 30 g de hipocloritos por kilo. En los procesos de lodos activados, las cifras son 5 a 25 kg de lodo/tonelada con 10 a 25 g de hipocloritos por kilo. Estos lodos contaminados pueden disponerse por incineración (dioxinas en aire), o en rellenos de seguridad. (Misko, 2012; Rullifank et al., 2020)

El problema que presentan los tratamientos de efluentes es que permanecen en las aguas efluentes ciertos compuestos tóxicos. El clorato, por ejemplo, actúa como alguicida. Se debe controlar también la carga orgánica que se vierte a los efluentes y las emisiones de fosfatos y nitratos. (Kozlowski & Helwig, 1998)

La contaminación del aire por las productoras de celulosa también es un punto para considerar en el proceso. Ya se mencionó que durante el proceso Kraft se forman y descargan a la atmósfera compuestos reducidos de azufre que causan mal olor. Los compuestos como los mercaptanos y el dimetilsulfuro surgen como consecuencia de la actividad de sulfuros y metilsulfuros sobre los componentes de la lignina. Las emisiones de material particulado llegan a 0,25Tn por tonelada de pulpa producida, pero pueden controlarse con precipitadores.(Misko, 2012; Rullifank et al., 2020)

## **2.9.Fibras alternativas**

El término fibra alternativa a la madera abarca una gama de plantas con características muy diferentes. Las fibras de origen no maderosa, también conocidas como «fibras alternativas», son materiales vegetales celulósicos no leñosos de los que se pueden extraer fibras de fabricación de papel. Las fibras alternativas más utilizados para la fabricación de papel son pajitas, bagasa de caña de azúcar, bambú, kenaf, cáñamo, yute, sisal, abaca, linters de algodón y cañas. La mayoría de las plantas no madereras son plantas anuales que desarrollan todo el potencial de fibra en una temporada de cultivo.

Con el fin de obtener pulpas celulósicas de materiales alternativos no leñosos, se han utilizado diferentes procesos clásicos químicos (utilizando reactivos químicos como soda, sulfato de sodio y sulfito sódico) y organosolv (utilizando disolventes orgánicos). En general, las materias primas no leñosas tienen una estructura con menor densidad y más porosa y, también en la mayoría de los casos, con menor contenido de lignina, lo que significa menos energía y requisitos químicos para la separación de fibra durante la producción de pulpa. Además, tienen ciclos de crecimiento más cortos, alcanzando la madurez más rápido que las especies de madera, y en muchos casos los rendimientos de pulpa obtenidos son más altos.(Pennells et al., 2020)

## 2.10. Características de las fibras alternativas

### Características físicas

Las fibras alternativas a la madera tienen diferencias ilimitadas en sus propiedades físicas y químicas, y todas cubren en grados variables una amplia selección de tipos de fibras y células. Las fibras a base de agro, como las pajitas de arroz y trigo, el bagazo de caña de azúcar y los tallos de maíz son más similares a las maderas duras, ya que la fracción de "fibra" está en el mismo orden; pero son considerablemente muy variadas y contienen una gran cantidad de células de paredes muy delgadas, células de parénquima en forma de barril, y células epidérmicas de vasos y finos en una amplia gama de tamaños. Las fibras vegetales no madereras tienen varias dimensiones medias en comparación con las dimensiones de las fibras de madera. Varias de las fibras no madereras son como las maderas duras de fibra corta, pero otras son tan largas que deben condensarse para mejorar el nivel de fabricación de papel. (Jahan et al., 2009)

En general, la longitud de la fibra no maderera es pequeña, lo que resulta en una tosquedad menor de estas pulpas. Estas dimensiones de fibra proporcionan una idea de la posible efectividad de estas pulpas en la fabricación de pulpa y papel. De hecho, desde el punto de vista práctico y de calidad, cualquier tipo de papel se puede formar utilizando la combinación adecuada de fibras no madereras (eventualmente mezcladas con fibras de madera). La longitud mínima de la fibra necesaria para producir propiedades aceptables de resistencia del papel depende de muchos factores, y las longitudes de la fibra no están exclusivamente relacionadas con las propiedades de resistencia del papel. Diferentes longitudes de fibra son deseables para diferentes propiedades en el papel. Por ejemplo, se desea una longitud de fibra más larga para las propiedades de resistencia en el papel, pero tienden a agruparse y, como resultado, no proporcionan una buena formación. Las fibras más cortas, por otro lado, proporcionan una excelente formación. (Ashori, 2006a; Jahan et al., 2011)

### Características químicas

La estructura química de los materiales de madera y no de madera consta de tres componentes principalmente, celulosa, hemicelulosa y lignina. Aunque la concentración de estos tres componentes puede variar de una especie a otra, las proporciones son de aproximadamente el 50 % de celulosa, el 25 % de hemicelulosa y el 25 % de lignina. La

estructura química de las fibras vegetales no madereras difiere ampliamente dependiendo del tipo de planta y el suelo y las condiciones de crecimiento. En cuanto a la estructura química, se puede observar que todas las fibras alternativas se caracterizan por un menor contenido de lignina que la madera y un mayor contenido de pentosano o hemicelulosa. La principal diferencia está en la mayor proporción de cenizas y sílice de las no madereras. La fibra de lino de semillas oleaginosas tiene propiedades químicas similares a las maderas duras; sin embargo, tiene propiedades físicas mayores que las maderas blandas. Las fibras de algodón contienen una proporción de celulosa dos veces más grande que las fibras de maderas blandas y sólo una pequeña fracción de lignina. (Ashori, 2006b)

### **Clasificación de las fibras alternativas:**



Los materiales de fibra no madereras utilizadas en la fabricación de papel se pueden dividir en las siguientes cuatro categorías:

- **Fibras Gramíneas**

El material de fibra de gramíneas se compone de varias secciones, cada una de las cuales consiste en nodos e inter-nodos. Este tipo de materias primas incluyen bambú, bagazo, paja de arroz, paja de trigo, residuos de sorgo, paja de maíz, caña, etc., en el que el contenido de celulosa es generalmente de alrededor del 50%, valores cercanos a los de la madera. Sin embargo, con la heterogeneidad de la celulosa, la utilización de este tipo de

plantas en el despulpado es mucho menor que la de la madera.(Eugenia Eugenio et al., 2019)

- **Fibras de líber**

El material de fibra líber generalmente se refiere a los materiales cuyo floema está altamente desarrollado. Este material incluye dos tipos, uno de los cuales es la corteza que ha demostrado ser de gran valor en la fabricación de pulpa y papel debido a las fibras abundantes en la corteza, como la morera, la estructura de la piel, la corteza del tallo de algodón; el otro de los cuales es el cáñamo, incluyendo kenaf, yute, cáñamo, lino, y así sucesivamente.(Eugenia Eugenio et al., 2019)

- **Fibras de semilla**

Este tipo de materias primas consiste en algodón y borra de algodón, y así sucesivamente. Con un contenido de celulosa tan alto como el 95%, la fibra de algodón es la fibra de celulosa más alta de la naturaleza, por lo que es una materia prima avanzada para la fabricación de papel. Además, la borra de algodón también son materias primas fibrosas de alta gama, que se pueden utilizar en la producción de papel base vulcanizado, servilletas de papel y otros productos para personas de la tercera edad.(Hammett et al., 2001)

- **Fibras de las hojas**

Las hojas de ciertas plantas son valiosas para la fabricación de pulpa y papel debido a la amplia celulosa, como las hojas de plátano, sisal, abacá, hojas de caña de azúcar, etc. En los últimos años, la fibra no maderera más utilizada es la paja, que representa el 46%, seguida del bagazo (14%) y bambú (6%). Otras fibras no madereras, por ejemplo, el algodón, el cáñamo, el sisal y el kenaf, también se están volviendo cada vez más importantes en la industria de la fabricación de pulpa y papel.(Castelló et al., 2016)

## **2.11. Fibras alternativas en la industria de papel**

Para la fabricación de la pulpa, la fibra no maderera tiene ventajas por ser una fuente abundante, bajo precio, fácil despulpado y superficie lisa de papel. Sin embargo, la pulpa de fibra alternativa tiene una menor resistencia que el papel, un filtrado de agua deficiente y un bajo rendimiento de fabricación.

Aparte de las razones anteriores, algunas fibras vegetales no madereras tienen demanda para la fabricación de papel debido a las propiedades especiales que las hacen superiores a las fibras de madera para papeles especiales. Las pulpas de bagazo ahora se

utilizan en casi todos los tipos de papel, como bolsa, envoltura, impresión, escritura, papel higiénico, toallas, vidrio, medio de corrugado, tablero de revestimiento, tableros blanqueados y existencias de base de recubrimiento. Las fibras de algodón se utilizan para papel membrete de alta calidad, papel moneda, pulpa de disolución y otros productos especiales. El bagazo y la paja son excelentes para los papeles y pueden reemplazar las pulpas químicas de madera dura para imprimir y escribir papel. Las pulpas hechas de plantas anuales no leñosas como el arroz y la paja de trigo, el bagazo, el lino o el kenaf son adecuadas como fibras de refuerzo en pulpas hechas de papel de desecho. La paja de trigo se ha presentado como un suministro adecuado para escribir e imprimir papel. Por lo general, las fibras de cáñamo se han utilizado como fuente para papeles especiales como la Biblia, cigarrillo, moneda, aislante y papel de seda. (Hammett et al., 2001)

### **Resistencia del papel húmedo**

Generalmente nos confundimos la resistencia de papel húmedo a la resistencia de tracción de papel húmedo, que es factible hasta cierto punto, pero no se aplica a las pulpas de fibras no madereras. La resistencia a la tracción de algunas pulpas de fibra no madereras es a menudo mayor que la de las pulpas químicas (mecánicas) de madera, pero las pulpas de fibra no maderera a menudo se disocian en el proceso de fabricación de papel. (De et al., 2021).

La resistencia a la tracción del papel húmedo no solo está relacionada con la resistencia a la tracción húmeda, sino también con el alargamiento del papel húmedo. Por lo tanto, para medir la resistencia del papel húmedo de fibra no maderera, cada aspecto debe considerarse de manera íntegra. Por ejemplo, aunque la pulpa química del kenaf tiene una mayor resistencia a la tracción, el alargamiento del papel húmedo es baja y su resistencia absoluta es baja, por lo que es propensa a romperse en la producción. La siguiente tabla muestra unas propiedades de fibras no maderera dentro del papel húmedo.

*Tabla 1: Características mecánicas de papel mojado con matriz de fibras alternativas (Liu et al., 2018)*

Pulpa	Índice de Resistencia a la tracción (N.m/g)*	Elongación (%)
Bagazo	0.695	6.09
Bagazo (Pulpa química)	0.636	9.67
Tallo Kenaf	0.521	10.31
Pulpa de caña (sulfito)	0.683	17.51
Kraft bambú	0.601	9.663

\* Índice de Resistencia a la tracción: la resistencia a la tracción por gramo de papel mojado

El parámetro que influye en la resistencia de tracción es la longitud de las fibras. La resistencia a la tracción del papel húmedo aumenta con el crecimiento de la longitud de la fibra. El alargamiento del papel húmedo depende de la acción sinérgica de todos los componentes de la fibra. Además, batir puede aumentar el alargamiento del papel mojado, que es el resultado del aumento del índice de engarce de fibra. Para la misma pulpa, el batido adecuado puede hacer que la fibra se inflame y se alargue, aumente el área de contacto entre las fibras y promueva la función de la fuerza de Van der Waals, con el fin de obtener una mayor resistencia al papel húmedo.(De et al., 2021)

### **Fuerza de adhesión**

La pulpa no maderera tiene una mayor fuerza de adhesión, que se atribuye a una mayor cantidad de hemicelulosa, menor longitud media de la fibra, grupos más detallados y mayor contenido de células de parénquima, entre las cuales, el contenido de pentosano tiene la mayor influencia en la fuerza adhesiva. En comparación con la pulpa de madera y la pulpa de algodón, la adhesión de la pulpa de paja de trigo es mucho mayor, principalmente debido al mayor contenido de hemicelulosa en la pulpa de paja de trigo, especialmente el pentosano.(Castelló et al., 2016; De et al., 2021; Eugenia Eugenio et al., 2019)

### Resumen de características mecánicas de las fibras no madera

Tabla 2: tabla recapitulativa de la resistencia a la tracción de fibras no maderas (Abd El-Sayed et al., 2020; Letter, n.d.; Liu et al., 2018; Pennells et al., 2020)

<i>Fibras lignocelulósicas</i>	<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Resistencia a la tracción (MPa)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>
<i>Caña (Saccharum officinarum)</i>	0,34 – 0,49	135 - 222	15 - 17
<i>Plátano (Musa sapientum)</i>	0,67 – 1,50	700 - 800	27 - 32
<i>Moriche (Mauritia flexuosa)</i>	1,15 – 1,62	129 - 254	19 - 23
<i>Coco (Cocos nucifera)</i>	1,15 – 1,52	95 - 220	4 - 6
<i>Algodón (Gossypium M.)</i>	1,51 – 1,60	287 - 800	6 - 13
<i>Piña (Ananas comosus)</i>	0,57 – 0,92	117 - 3000	27 - 80
<i>Lino (Linum usitatissimum)</i>	1,30 – 1,50	344 - 1035	26 - 28
<i>Cáñamo (Cannabis sativa)</i>	1,07	389 - 690	35
<i>Yute (Corchorus capsularis)</i>	1,30 – 1,50	393 - 800	13 - 27
<i>Ortiga blanca (Boehmeria nivea)</i>	1,5	400 - 1620	61 - 128
<i>Sisal (Agave sisalana)</i>	1,26 – 1,50	287 - 913	9 - 28
<i>Madera dura (Betula)</i>	0,67 – 1,50	300 - 1500	30 - 80

## **2.12. Ventajas y desventajas del uso de fibra alternativa a la madera para la fabricación de papel**

Debido a la alta demanda del mercado, los problemas ambientales y al gran uso de la madera en la industria de la pulpa y el papel ha aumentado el interés por explorar las plantas no madereras como fibra de sustitución que también es sostenible con el medioambiente. Por lo tanto, la utilización de fibra no maderera es una opción excelente para producir pulpa y papel para reducir la deforestación de las selvas tropicales o bosques primitivos en el mundo.

Algunas fibras no madereras utilizadas para la fabricación de papel tienen altos rendimientos anuales por hectárea. El rendimiento anual promedio por hectárea de kenaf es alrededor de dos veces mayor en comparación con el de las maderas blandas de rápido crecimiento. El contenido de lignina en las fibras no maderosas es menor en comparación con las maderas. En general, es más fácil deslignificar las no maderas, porque poseen menores energías de activación. Las mayores diferencias entre los dos tipos de fibras en la obtención de pulpa están resumidas en la siguiente tabla (Bajpai, 2021a)

Tabla 3: tabla comparativa entre la madera y la fibra alternativa en el proceso de fabricación de papel y pulpa (Bajpai, 2021a)

	<b>Madera</b>	<b>Fibra alternativa</b>
<b>Ciclo de crecimiento</b>	largo ciclo de crecimiento	ciclo de crecimiento corto
<b>Contenido en celulosa</b>	Alto contenido	Bajo contenido (depende del tipo de fibra)
<b>Contenido en lignina</b>	Alto contenido	Bajo contenido
<b>Uso de productos químicos</b>	Utilizar un gran volumen de producto químico durante proceso de despulpado	Utilizar una pequeña cantidad del producto químico en proceso de despulpado
<b>Tiempo de proceso</b>	Necesita más tiempo para el proceso de pulpado	Corto tiempo de pulpado
<b>Costes de procesos de transformación</b>	Caro debido a la limitación de recursos	Coste más barato por la abundancia de recursos
<b>Impacto sobre el medio ambiente</b>	Aumentar el problema ambiental como el calentamiento global y la erosión del suelo, responsables de alrededor del 17% del presupuesto mundial de carbono	Reducir el impacto ambiental que reduzca el problema de la deforestación y mejorar la silvicultura sostenible
<b>Almacenamiento y gestión</b>	fácil	difícil
<b>Etapa de limpieza</b>	fácil	difícil
<b>Recuperación de productos químicos</b>	Posible	difícil
<b>Rendimiento de la máquina de fabricación de papel</b>	Alto	Bajo



# Objetivos

### 3. Objetivos:

La creciente demanda de papel ha aumentado la necesidad de materias primas de bajo costo y también el desarrollo de nuevos procesos con el fin de impulsar la producción sin olvidar el alto impacto perjudicial sobre el medio ambiente del uso de la madera. Las fibras no madereras, por ejemplo, los residuos agrícolas y las plantas anuales como hemos dicho previamente, se consideran una fuente alternativa eficaz de celulosa para producir pulpa y hojas de papel con propiedades aceptables.

Uno de los principales retos a los que se enfrenta la humanidad hoy en día es la creciente generación de residuos sólidos. Esto, es el resultado de la economía lineal y de una población urbana creciente. La economía circular ha ganado atención como concepto clave para desarrollar ciclos técnicos y biológicos de circuito cerrado.

Integrar las fibras alternativas en procesos de fabricación de papel permite reducir el uso de la madera, así como disminuir el impacto medioambiental, la deforestación y el cambio climático. También permite crear nuevos recursos económicos para los sectores agrícolas. Las fibras alternativas que provienen de los residuos agrícolas o que tienen un ciclo de crecimiento rápido pueden ser incorporados en el proceso de fabricación de pulpa, también en el reciclaje de papel y cartón como finalidad de mejorar las características de estos productos de consumo cotidiano.

En este trabajo, se estudia tres fuentes alternativas a la madera que son la espiga de Maíz (*Zea mays*), bagazo de Alcachofa (*Cynara scolymus*) y el tronco de Malva (*Malva arborea*). Por ello se plantean los siguientes objetivos:

- ✓ Investigar sobre fuentes alternativas de fibras lignocelulósicas a la madera en la fabricación de papel.
- ✓ Caracterización físicas y químicas de las fibras no madereras.
- ✓ Integración de las fibras como cargas en el proceso de fabricación de papel para mejorar las propiedades de cartón reciclado.
- ✓ Reducir el uso de cartón bruto en el proceso de reciclaje.
- ✓ Investigar sobre el efecto de las fibras alternativas en la fabricación de cartón reciclado.



# Experimental

## 4. Materiales y métodos

A través de este trabajo se investiga sobre el efecto de carga de fibras no madereras como alternativa en la fabricación del papel para mejorar las características fisicoquímicas de papel reciclado, y para eso se procedió de la siguiente manera:



### 4.1. Preparación de la carga

Como está indicado previamente, las 3 especies utilizadas en este estudio son:

- M<sub>1</sub>: Bagazo de Alcachofa (*Cynara scolymus*)
- M<sub>2</sub>: Tallo de Malva (*Malva arborea*)
- M<sub>3</sub>: Espiga de Maíz (*Zea mays*)

Tabla 4: características generales de la materia prima utilizada

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
<b>Especie</b>	<i>Cynara scolymus</i>	<i>Malva arborea</i>	<i>Zea mays</i>
<b>Tipo de planta</b>	planta herbácea	Planta bienal	gramínea anual
<b>Parte de la planta</b>	Bagazo	Tallo	Espiga
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,0032	0,0047	0,0049
<b>Procedencia</b>	C.Valenciana	C.Valenciana	C.Valenciana



Las especies recogidas se secaron en una estufa durante 24 horas a  $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y trituradas a tamaños de unos centímetros en la trituradora industrial para la obtención de serrín que facilitara sus pulverizaciones. Los trozos obtenidos se introdujeron en la pulverizadora ULTRA CENTRIFUGAL MILL ZM 200 (RETSCH Mill) equipada de un tamiz de 50 micras y una velocidad de 10000 rpm para la obtención de polvo fino que se utilizó como carga con el cartón reciclado y también en la etapa de caracterización. El polvo obtenido se conservó en bolsas en un lugar seco.



Figura 9: (a) trituradora industrial (b) micronizadora 250 $\mu\text{m}$

## 4.2. Caracterización de las fibras

### 4.2.1. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico es una técnica de análisis térmico que consiste en medir la pérdida de masa de una muestra en función del tiempo, para una determinada temperatura o perfil de temperatura y en atmósfera controlada. Esta técnica permite concluir sobre la estabilidad de la muestra frente un tramo de temperatura.

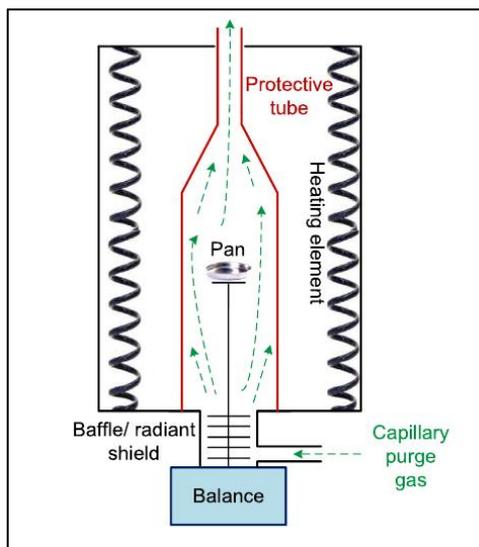


Figura 10: esquema de termobalanza y su principio de funcionamiento

Se llevó a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) para definir la estabilidad térmica de fibras mediante el uso de una termobalanza STA PT1600 TG-DSC/DTA (Linseis THERMAL ANALYSIS). Particularmente se colocaron muestras cortadas de cada especie estudiada, previamente secadas, de pesos entre 10 y 15 mg en un crisol y se calentaron a partir de 30°C a 750 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno con un flujo de 60 ml/min.



Figura 11: Linseis THERMAL ANALYSIS

#### 4.2.2. Espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) es una poderosa herramienta de análisis para caracterizar e identificar moléculas orgánicas. Es la técnica espectroscópica más utilizada para determinar las características de muestras en polvo. En el modo de reflectancia total atenuada, este tipo de espectroscopia permite identificar grupos funcionales presentes a una profundidad de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . Durante el análisis ATR, la muestra se mantiene en contacto con un cristal permitiendo una reflexión interna total. Un rayo infrarrojo llega al cristal donde se coloca el material en estudio. El reflejo interno del rayo en el cristal da lugar a una onda evanescente que, en cada reflexión, continúa más allá de la superficie del cristal y penetra en la muestra durante aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . La profundidad de penetración depende de la longitud de onda, el ángulo de incidencia del haz en el cristal y la naturaleza del cristal. Se obtienen así espectros (curvas de absorbancia vs. longitud de onda) que tienen picos de absorción característicos de las funciones presentes en las muestras. FTIR-ATR es un método sensible y no destructivo que se puede utilizar cualitativa y cuantitativamente. Sin embargo, requiere una muestra de secado previa. Las muestras de las cargas están analizadas mediante Perkin Elmer® FTIR-ATR con una resolución espectral de 4  $\text{cm}^{-1}$  y el rango de escaneo fue de entre 600 y 4000  $\text{cm}^{-1}$ .



Figura 12: Perkin Elmer® FTIR-ATR

### 4.3. Análisis morfológico

#### Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo-FESEM

La microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM) es una tecnología avanzada utilizada para capturar la imagen de microestructura de los materiales. FE-SEM se realiza típicamente en un alto vacío porque las moléculas de gas tienden a perturbar el haz de electrones y los electrones secundarios y retro dispersado emitidos utilizados para la proyección de imagen. Con el fin de caracterizar los especímenes en este estudio, ZEISS ULTRA 55 (Oxford Instrument<sup>®</sup>) se utilizó para capturar la imagen de la microestructura con un voltaje de aceleración de electrones de 2 kV. Los especímenes fueron cortados en tamaños más pequeños de aproximadamente 5×5×5 mm, pulidas en papel abrasivo de gramaje 500 y 2000 en seco y después se limpian con nitrógeno a presión seguido de un recubierto con platino para metalizar sus superficies.

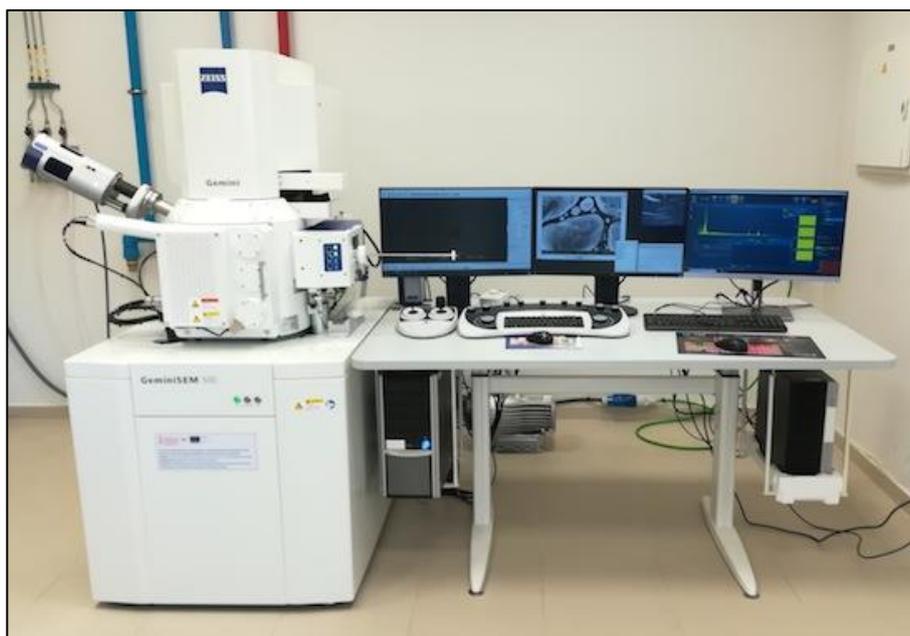


Figura 13: ZEISS ULTRA 55 Oxford Instrument<sup>®</sup>

### 4.4. Análisis de la composición química

La composición química de las muestras estudiadas se ha determinado según el método Chasson-Datta (Maryana et al., 2019a) para la determinación de porcentaje de celulosa, hemicelulosas, lignina y compuesto hidrosoluble. Este método consiste en la neutralización progresiva de cada componente de la biomasa teniendo en cuenta la masa perdida después cada paso.

El protocolo experimental es como el que se define a continuación:

- 1- Secar la materia pulverizada a 500  $\mu\text{m}$  en una estufa a 40°C por 72h y guardarla en un desecador hasta que se estabiliza su masa.



Figura 14: Preparación de las muestras

- 2- Hervir 1g (a) de cada muestra en 150 ml de agua destilada por 1 hora
- 3- Filtrar la mezcla con papel de filtro de tamaño de poros de 90 mm
- 4- Limpiar el residuo filtrado con 300 ml de agua caliente. La fracción sólida obtenida se secó y guardó en un desecador hasta obtener una masa constante. La masa obtenida se anota como fracción (b)

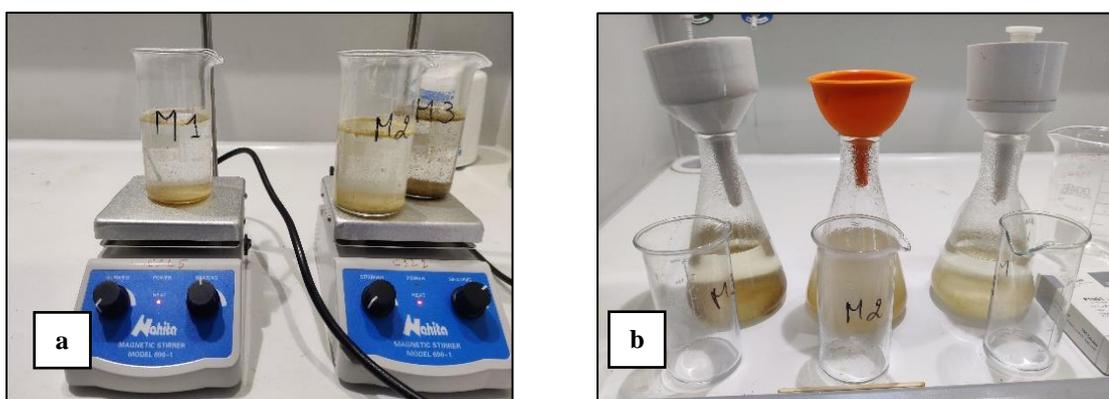


Figura 15: (a) muestras en ebullición en agua (b) etapa de filtración

- 5- La fracción (b) se mezcló con 150 ml de ácido sulfúrico 1N (0.5 mol/l) por 1 hora con un calentamiento medio.
- 6- La mezcla obtenida se filtró y limpió con 300 ml de agua destilada en ebullición
- 7- Después de secarlo, el residuo de filtración se pesó y anotó como fracción (c)

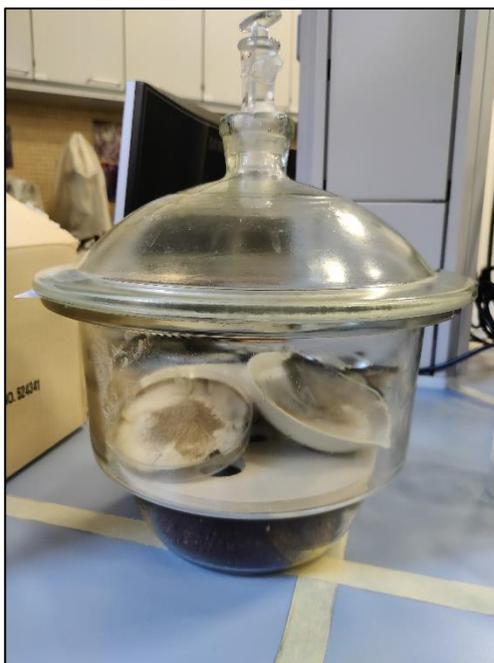


Figura 16: etapa de estabilización de la masa

- 8- El residuo seco (c) se empapó en 10 ml de ácido sulfúrico a 72% de concentración y se dejó reaccionar durante 4 horas.
- 9- El compuesto acuoso, obtenido previamente, se integró en un dispositivo de reflujo mientras se mezclaba con 150 ml de ácido sulfúrico 1N a alta temperatura y alto reflujo durante una hora.
- 10- La mezcla se neutralizó con 400 ml de agua destilada y filtró, secó, y pesó como anteriormente.



Figura 17: (a) precipitado obtenido después el ataque ácido a 72% (b) montaje a reflujo (c) muestra deslignificada

- 11- La muestra (d) obtenida en el paso anterior, se puso en un crisol y se introdujo en una mufla a 500°C durante 30 minutos. La ceniza obtenida (e) se pesó con una balanza de precisión.

Las masas obtenidas “a”, “b”, “c”, “d” y “e” después de cada reacción se integraron en un modelo matemático para calcular el porcentaje de cada componente de los residuos de biomasa.

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \frac{b - c}{a} * 100$$

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{c - d}{a} * 100$$

$$\% \text{ Lignina} = \frac{d - e}{a} * 100$$

*NB: Todos los reactivos utilizados son de escala analítica*

## 4.5. Preparación de las muestras de papel

### Material utilizado



*Figura 18: material utilizado para la fabricación artesanal del papel*

## **Método**

Nuestro objetivo principal es reducir la cantidad de papel del proceso de reciclaje y de mejorar las características mecánicas de cartón reciclado. Para comparar el valor añadido de las cargas, se preparan 4 muestras de cartón reciclado de dimensión 30 cm x 21 cm. Las probetas se identificaron como sigue:

M<sub>0</sub>: Cartón reciclado sin carga (esta probeta se considera como referencia)

M<sub>1</sub>: Cartón reciclado con carga de fibras de alcachofa

M<sub>2</sub>: Cartón reciclado con carga de fibras de malva

M<sub>3</sub>: Cartón reciclado con carga de fibras de maíz

- Según la bibliografía, se ha considerado una carga del 30% para cada probeta por cada variedad de biomasa.
- Las cargas utilizadas fueron utilizadas en forma de polvo inferior a 500 µm.
- Se obtuvo un espesor de hojas de cartón de 2 mm ± 0.5mm.
- Se corta una hoja de cartón, de 1 milímetro de espesor, en cuadrados de 2 cm y se deja secar hasta obtener una masa constante. Se pesan 21 gramos de cartón como matriz para cada muestra M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub>. La probeta M<sub>0</sub> se consideró como referencia sin carga con 30 gramos de cartón reciclado.

Cada pesada se introdujo en un vaso de precipitados de 1 litro con agua y se dejó en remojo al menos 24h. Mediante un sistema de batidora se trituró y agitó cada muestra en agua hasta obtener una pasta homogénea. A continuación, se añadió cada muestra de carga, previamente pesada y secada, y se repitió el proceso de agitación.

El recipiente de plástico se llenó a un tercio de su volumen con agua. En el marco se vertió la muestra viscosa y se esparció por todo el tamiz para intentar de obtener una superficie uniforme. Se cubrió la parte superior del papel mojado obtenido con un lienzo de tejido y se escurrió el agua mediante una esponja. Acto seguido, se dio la vuelta al conjunto, se quitó el tamiz y se cubrió la otra cara del papel mojado. Estos pasos se repitieron para cada muestra y con cada pulpa. Una vez realizados todas las muestras se cubrieron con una plancha de material composite para introducirlas en una prensa a mano de 15 toneladas y así quitar el máximo contenido de agua que tenían dichas muestras y finalmente obtener una superficie lisa y un papel de 1.5 milímetro de espesor. Por último,

se dejó secar durante 48 horas dentro de una estufa a 40°C para evitar obtener hojas con ondulación.



## 4.6. Caracterización del papel acabado

### Resistencia a la tracción

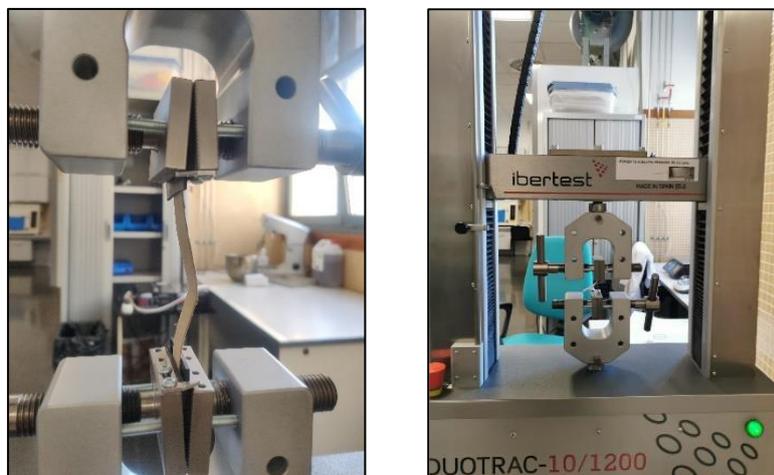


Figura 19: Ibertest® DUOTRAC-10/1200-400

Este ensayo se realizó según la norma UNE-ISO 15754:2012 mediante la máquina de tracción universal de la marca Ibertest® modelo DUOTRAC-10/1200-400. La velocidad del ensayo se fijó a 5 mm/min y con una célula de carga de 10kN. Las probetas se prepararon según la norma vigente y se realizaron 5 repeticiones por cada tipo de material de papel y así obtener valores reproducibles. Este ensayo se realizó en condiciones normales de temperatura y de humedad y nos permitió obtener la resistencia de cada muestra de papel en frente de una fuerza de tracción.

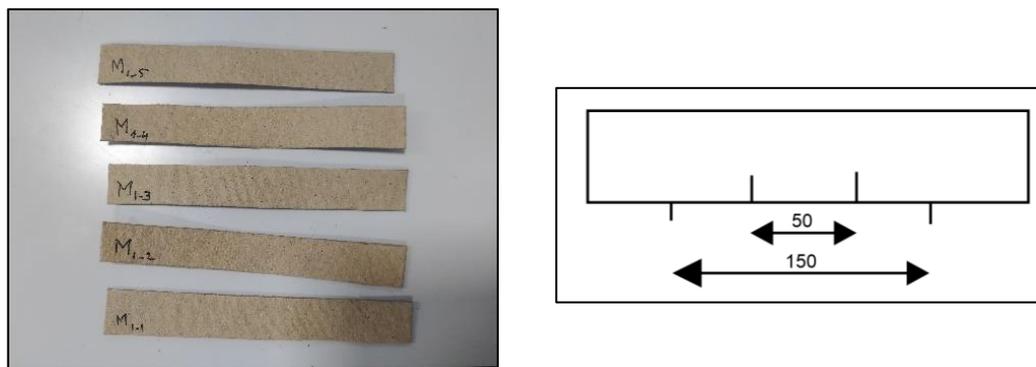


Figura 20: Probetas de tracción

### Resistencia al desgarro

El ensayo de desgarro nos permitió determinar la fuerza necesaria para desgarrar una sola capa de papel una vez iniciado el ensayo. La resistencia al desgarro es la fuerza necesaria para propagar una grieta o corte a través de una hoja de papel. Dicha fuerza se midió en Newton (N). El principal método utilizado para evaluar la resistencia al desgarro es la prueba de rasgado de Elmendorf. Este ensayo se realizó según la norma INTE/ISO 1974:2014 (Papel y Cartón. Determinación de la resistencia al desgarro. Método Elmendorf.) mediante la maquina universal de tracción con una célula de 10kN a una velocidad de 20mm/min. Cinco probetas de cada muestra se prepararon según las medidas indicadas por la norma como se indica en el siguiente esquema.

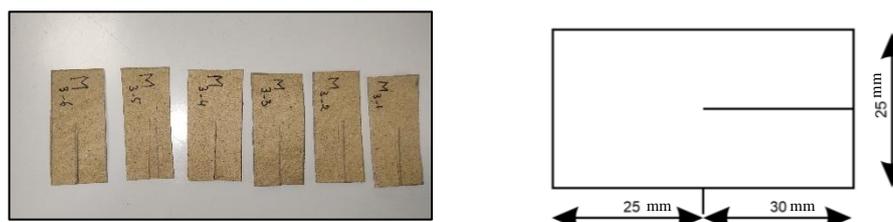


Figura 21: Probetas del ensayo de desgarro



# Resultados

Resultados

## 5. Resultados

### 5.1. TGA y Composiciones químicas de las cargas

El análisis termogravimétrico (TGA) nos ha permitido obtener una aproximación de la composición general de cada una de las cargas estudiadas. A través de esta técnica también podemos evaluar la estabilidad térmica de las fibras lignocelulósicas, muy poco estudiadas para la utilización como fibras de refuerzo en el campo de los materiales. Como se puede constatar en las curvas de las figuras 22, 23 y 24, se observa un cambio entre el 8% y el 14% de pérdida de masa entre 60° y 100°C para las tres muestras analizadas (alcachofa, malva y maíz). Este primer cambio se atribuye a la evaporación de agua que contiene la fibra. Esta pérdida es inevitable incluso para las muestras secas y eso confirma la alta absorbancia de humedad de las fibras lignocelulósicas debido a sus estructuras porosas. El mayor porcentaje de pérdida de masa se observa alrededor de los 300°C y se debe principalmente a la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa (63.29% para alcachofa, 50.98% para la malva y 57.05% para la mazorca de maíz). Como hemos mencionado previamente, las fibras lignocelulósicas tienen un alto contenido en celulosa y muy baja cantidad de lignina como le confirma *Ghaffar et al* (Ghaffar & Fan, 2013). Sobre los 450°C se observa la descomposición de los ciclos aromáticos de la estructura compleja de la lignina.

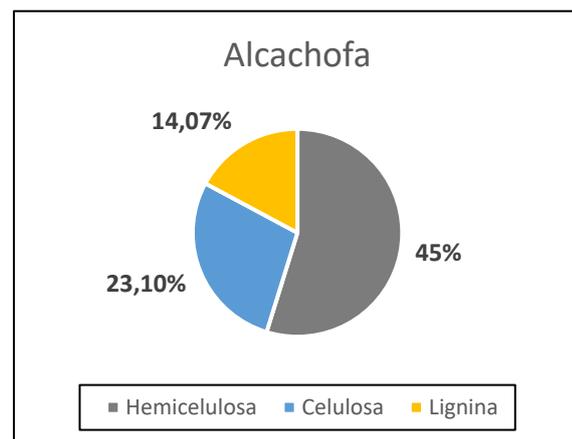
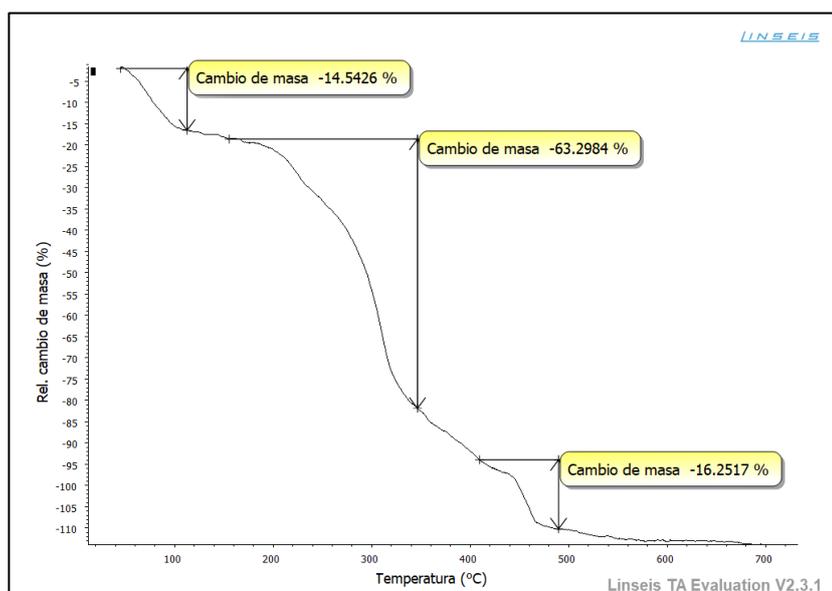


Figura 22: análisis térmico TGA y química de una muestra de alcachofa M1

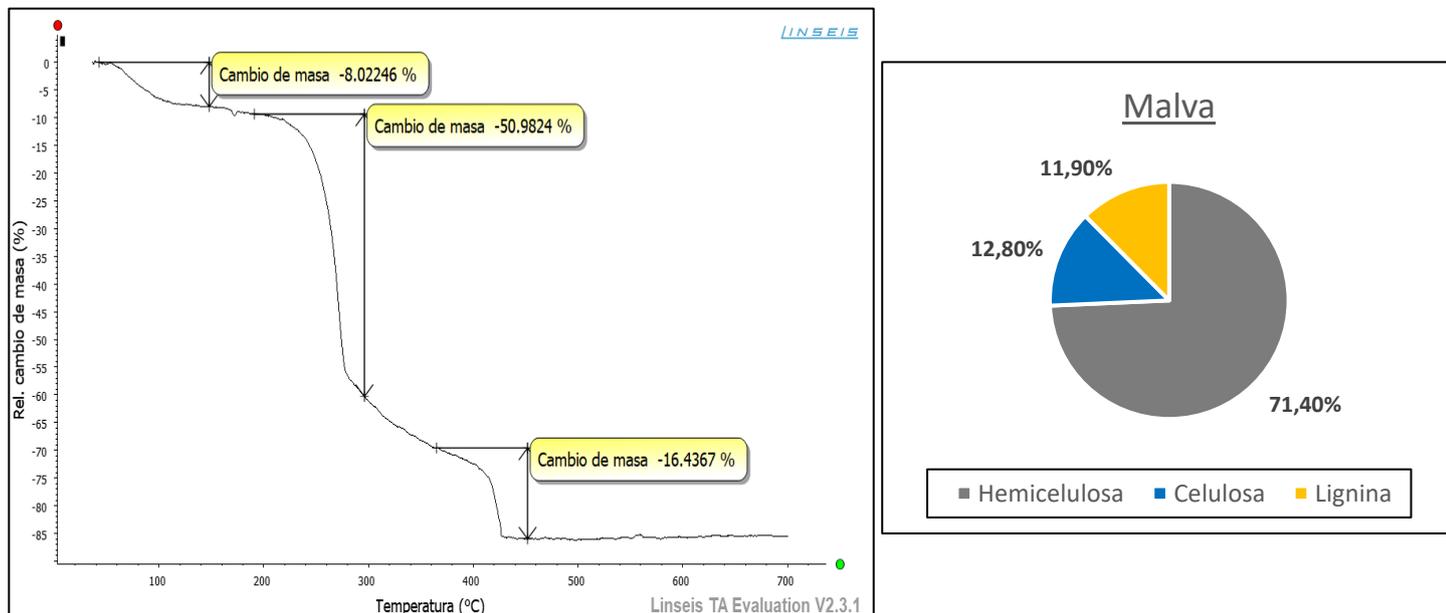


Figura 23:: análisis térmico TGA y químico de una muestra de malva M2

Los resultados obtenidos mediante TGA están en concordancia con los resultados del análisis químico de las muestras estudiadas. Como podemos observar el método Chasson-Datta que nos confirma un alto contenido en hemicelulosa. Sin embargo, la cantidad de celulosa de las fibras es relativamente baja comparándose con la celulosa que contienen las fibras obtenidas a partir de la madera. Los tipos de fibras estudiados tienen la ventaja de tener una muy baja cantidad de lignina que nos permite obtener mejores resultados en la fabricación de pulpa y papel evitando extraer este compuesto mediante procesos químicos agresivos.

Según este análisis químico se puede concluir que el tallo de Malva tiene el mayor contenido en celulosa (por el alto contenido en fibras lignocelulósicas) como se observa en la imagen de la Figura 22 donde se observa una estructura macroscópica de fibras aglutinadas que forman un mechón de fibras. El maíz pertenece a la familia de las gramíneas y su fruta (la espiga) es rica en almidón, por esta razón contiene un porcentaje muy alto en hemicelulosa que está constituido de diversos polisacáridos.

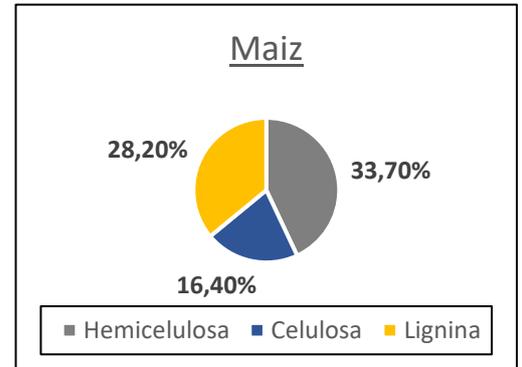
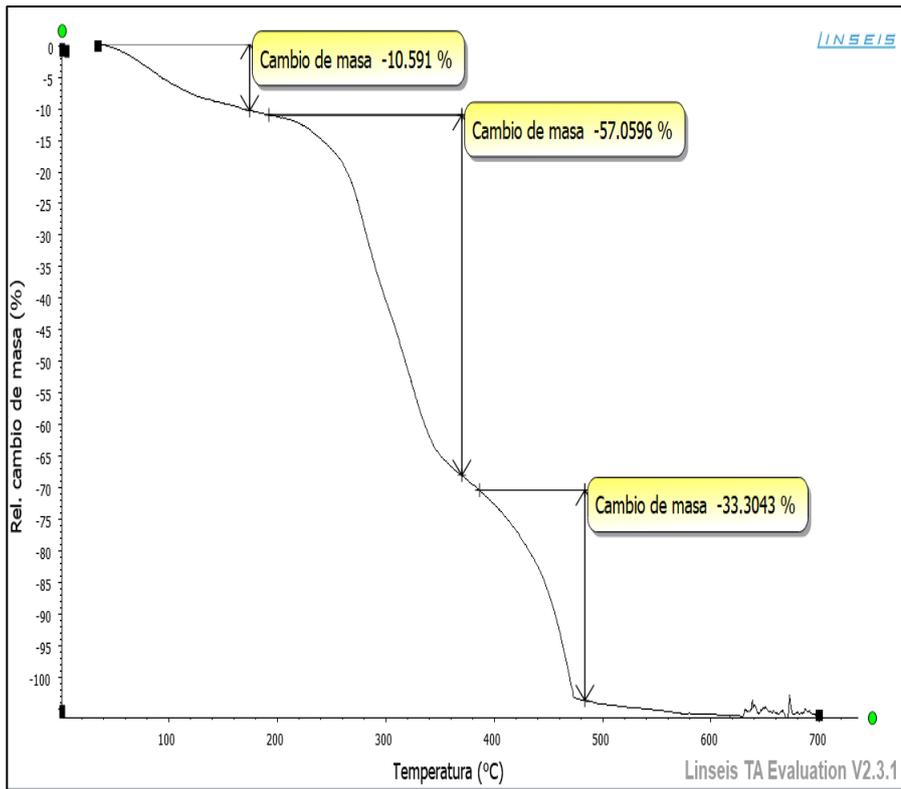


Figura 24: análisis térmico TGA y químico de una muestra de maíz M3

## 5.2. Análisis FTIR

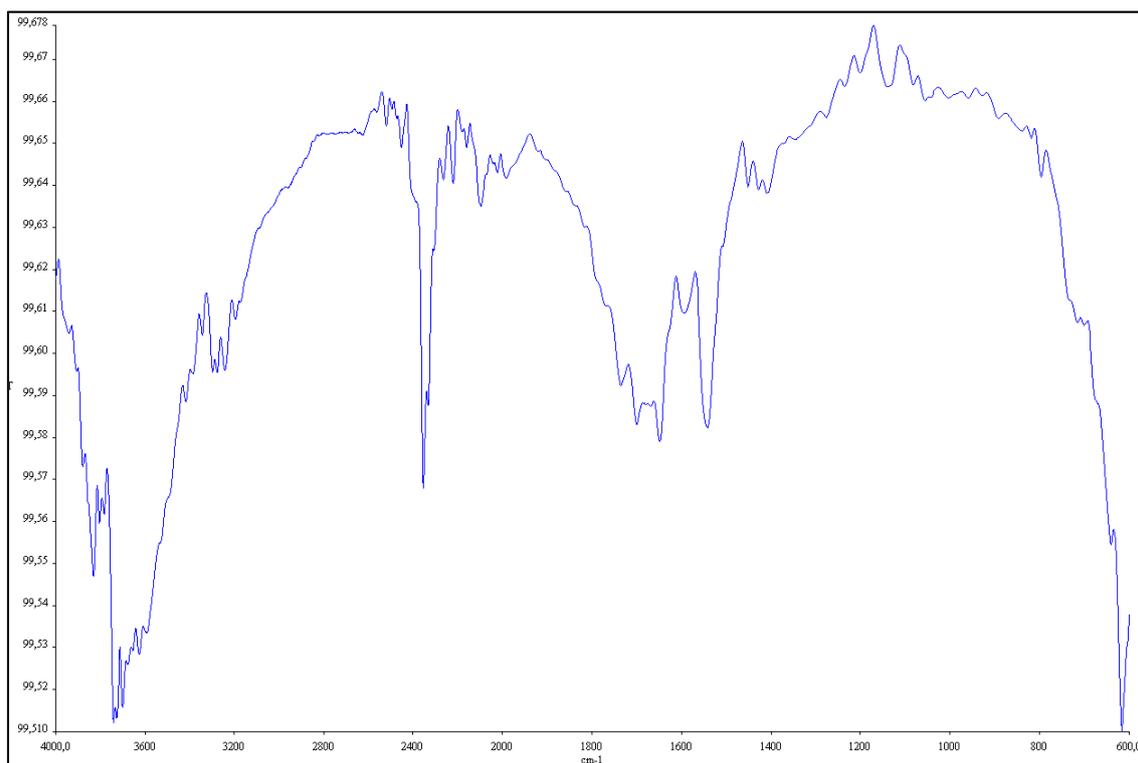


Figura 25: espectrofotómetro FTIR de la muestra de la malva

La figura 25 representa el espectro de absorción de la malva a partir de un análisis FTIR. En este espectrofotómetro podemos observar los picos asociados a la vibración de cada grupo funcional de la estructura de las fibras o de los componentes de las partículas lignocelulósicas. El pico constatado alrededor de los  $3400\text{ cm}^{-1}$  se observa típicamente en los materiales lignocelulósicos y está atribuido a la adsorción del grupo O-H. Dicho pico está asociado al agua que tiene la fibra, aunque también a los grupos alcohol que constituyen las paredes de las células vegetales y que indica la presencia de celulosa. El segundo pico más relevante se observa a una longitud de onda de  $2900\text{ cm}^{-1}$ . Este pico se asocia a la vibración del grupo C-H típico de cada compuesto orgánico. Asociando este pico a al primer pico de absorbancia obtenida (grupo O-H) podemos concluir una presencia de ácidos carboxílicos en la estructura de la malva. Las bandas obtenidas entre  $1800$  y  $1600\text{ cm}^{-1}$  se asocian a vibraciones típicas en el análisis FTIR de biomasa. Concretamente estos picos indican la presencia de compuestos glucídicos de la estructura de la fibra. El último pico observado sobre  $600\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de un grupo piranosa que confirma la estructura polimérica de las células vegetales constituida de  $\beta$ -

glucano. Las referencias bibliográficas confirman los resultados obtenidos en este estudio (Monteiro et al., 2014)

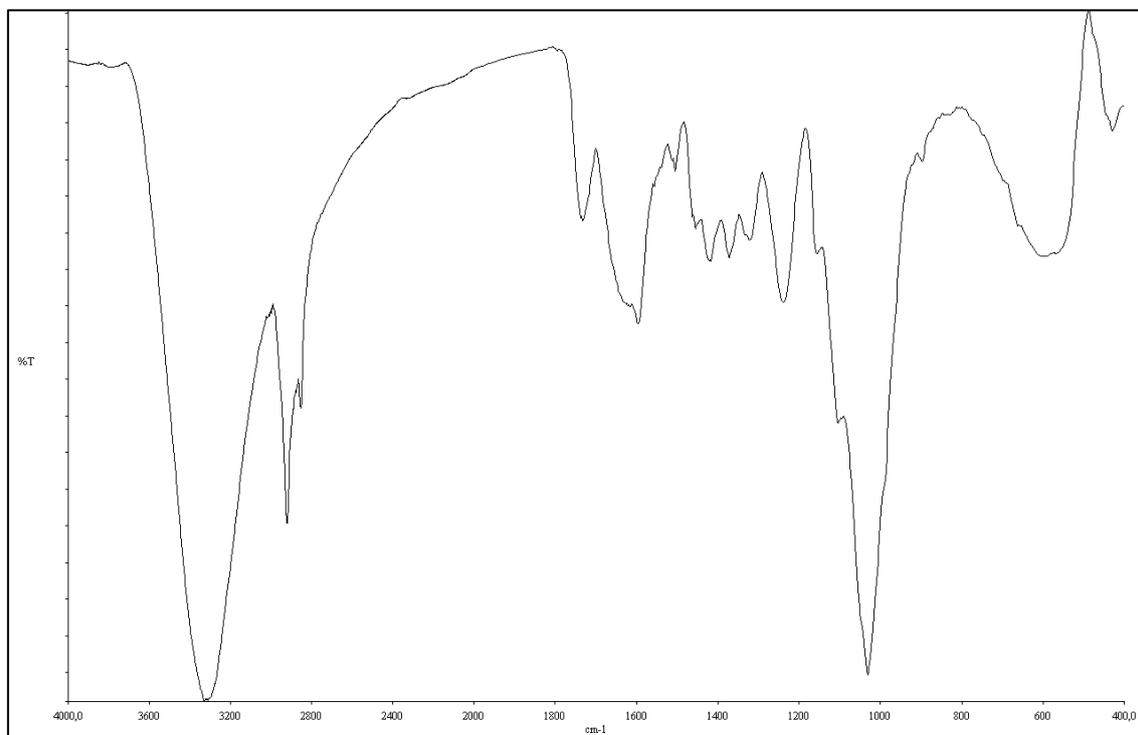
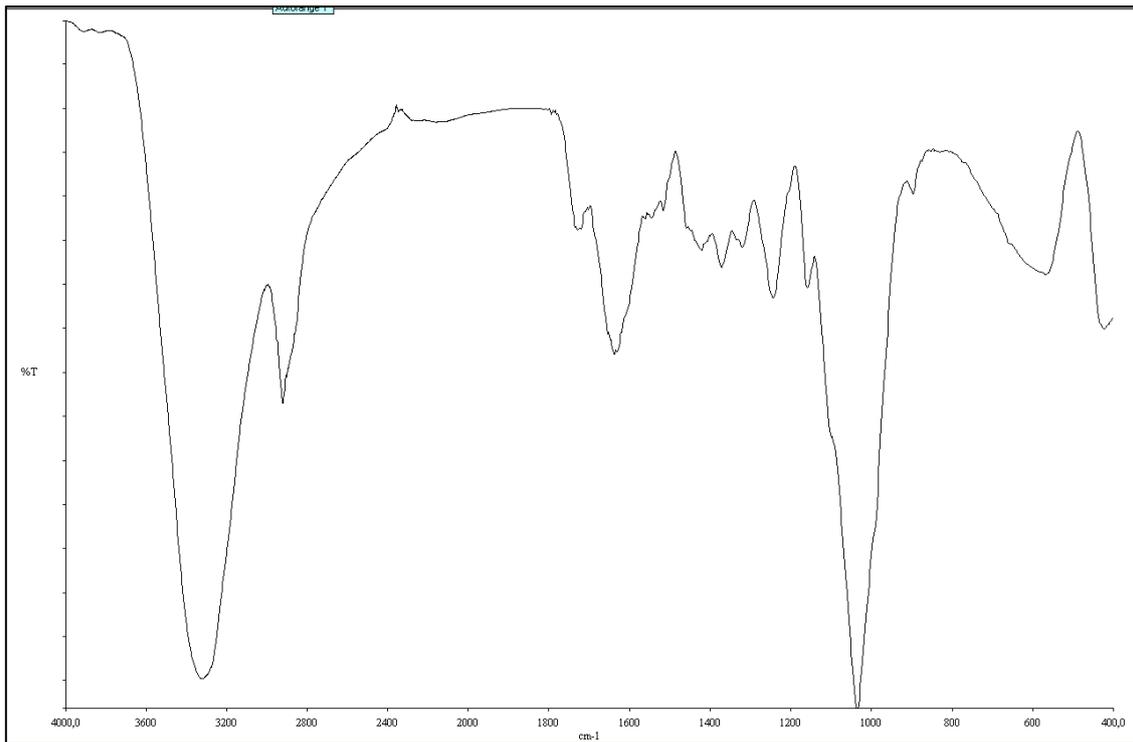


Figura 26: FTIR de la muestra de alcachofa

En el análisis ftir de la muestra de alcachofa podemos ver la presencia de un nuevo elemento alrededor de  $1000\text{ cm}^{-1}$  que conviene a la vibración típica de un grupo alcohol y según el pico observado nos podemos concluir la presencia de alta concentración de este elemento. La presencia del enlace  $\text{C}=\text{O}$  expresado por la vibración a  $1740\text{ cm}^{-1}$  confirme la presencia de una cetona alifática que indica la existencia de un ácido carboxílico. Las otras vibraciones observadas en este espectrofotómetro son típicas en las fibras lignocelulósicas (Maryana et al., 2019b)



*Figura 27: FTIR muestra maíz*

A analizar la muestra de mazorca con FTIR, hemos obtenido unos resultados idénticos aquellos del análisis de la alcachofa. La presencia de los mismos grupos funcionales puede confirmar que las plantas primarias ricas en fibras lignocelulósicas tienen una estructura muy parecida y considerada como simple comparada a especies más evaluadas.

### 5.3. Estudio morfológico

#### Alcachofa FESEM

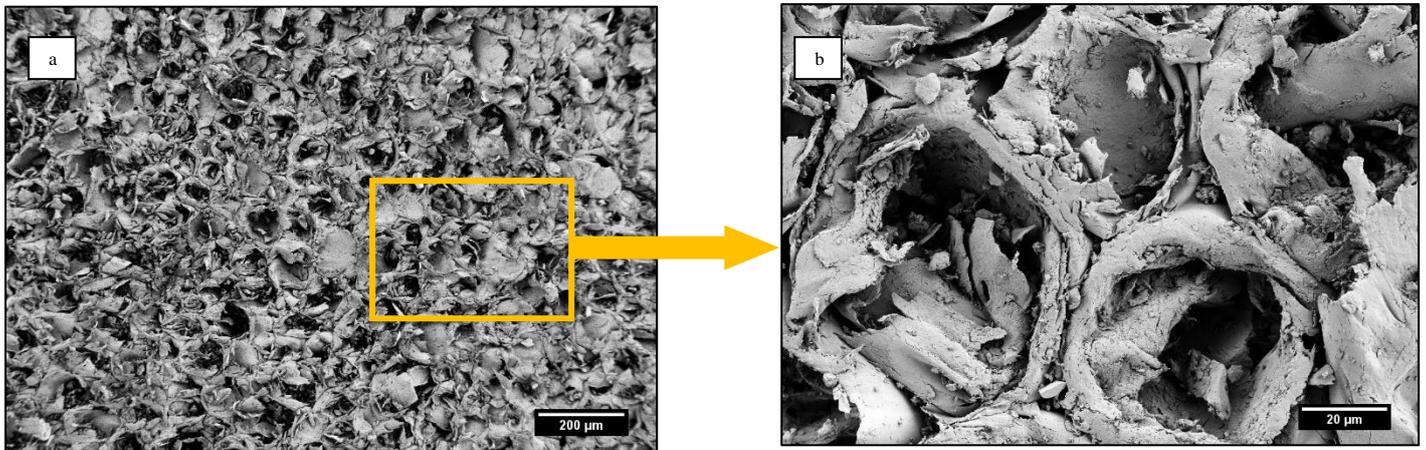


Figura 28: Vista transversal del bagazo de alcachofa a 75X aumento (imagen a) e a 770 aumento (imagen b)

Las imágenes de FESEM de un corte transversal del bagazo de alcachofa presenta una estructura fibrosa. Las fibras de alcachofa están unidas entre ellas con pectinas y elementos no celulósicos para formar un conjunto en la dirección longitudinal que es la dirección de crecimiento de la planta (imagen (a) X75 aumento). La imagen (b) es una focalización (a 770X) en una zona del tronco y a través de ella podemos ver la forma poligonal de las fibras que tiene una sección de aproximadamente 40 µm que tiene un orificio central denominado lumen. Al igual que otras fibras naturales, la variabilidad del diámetro de las células de la fibra y del lumen tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas de la fibra de alcachofa.

#### Malva

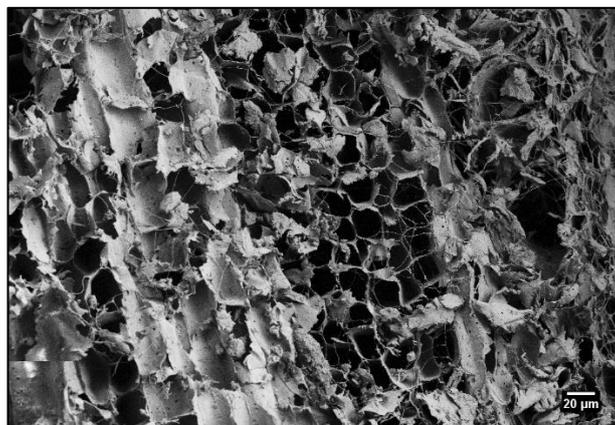
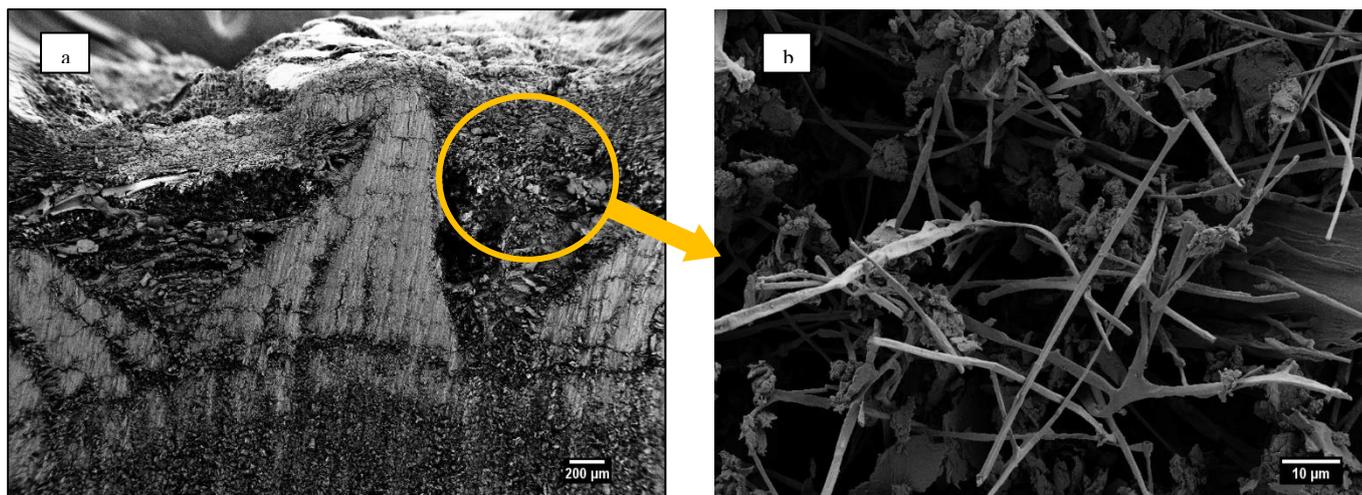


Figura 29: Corte longitudinal de un tronco de malva (X 250 aumentos)

El análisis de la zona central de un corte transversal de un tallo de malva nos revela una estructura fibrosa lo que puede confirmar la blandura del tronco de este arbusto comparado a otras especies del mismo tipo. Podemos constatar también la presencia de dos tipos de estructura: la estructura primaria de los arbustos que tienen fibras largas en el sentido longitudinal y también la malva presenta una estructura secundaria incompleta de fibras radiales horizontales que se parece a la estructura típica de la madera de los árboles.



La estructura del tallo presenta otra irregularidad que podemos ver en la imagen (a) en la zona exterior del tronco, podemos ver la continuidad radial de las fibras secundarias y también la estructura presenta una zona intermedia (imagen b) que confirma la presencia de fibras desordenadas del tamaño aproximativo de 65  $\mu\text{m}$ . Estas últimas son dadas a la disposición grupada de fibras primarias cerca del borde del tallo estos da una densidad baja de 0.0047  $\text{g}/\text{cm}^3$  para un arbusto de tamaño de 2 metros.

La irregularidad de la estructura del tronco de la malva confirma su alto contenido en hemicelulosa que hemos visto en su análisis químico. Esto es un punto característico de las especies secundarias como árboles o especies dicotiledóneas.

## Maíz

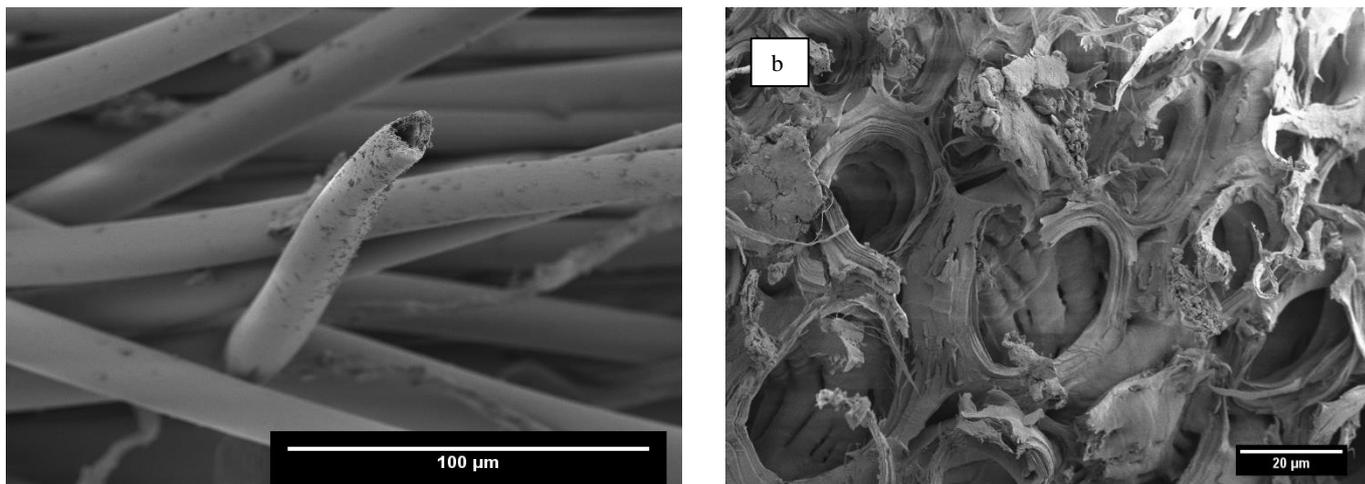


Figura 30:FESEM de mazorca de maíz a x866 aumento (imagen a) y a x445 aumento (imagen b)

La micrografía FESEM de la mazorca de maíz presenta una estructura fibrosa y un diámetro de fibras de 25  $\mu\text{m}$ , pero en este caso las fibras forman un conjunto menos condensado que las otras especies analizadas. Las fibras de maíz tienen una longitud aproximativa de 100  $\mu\text{m}$ . las fibras de maíz, consideradas cortas, nos permitirá obtener un comportamiento más homogéneo frente a sollicitaciones mecánicas y una mejor miscibilidad con las fibras de cartón reciclado

## 5.4. Caracterización mecánica

### 5.4.1. Tracción

El ensayo de tracción nos ha permitido obtener información sobre el comportamiento mecánico de las muestras de cartón. La tabla 5 resume los datos relevantes obtenidos tras el ensayo de tracción con una célula 10 kN para las cinco probetas normalizadas de cada muestra de papel. Como se puede constatar la muestra  $M_0$  del papel sin carga, presenta altos valores de resistencia y de módulo de elasticidad. Esta diferencia se debe a la homogeneidad de la muestra al contrario de los que llevan carga. También se puede relacionar la diferencia a la presencia de un alto contenido de hemicelulosa en las cargas estudiadas.

Tabla 5: resistencia máxima y el módulo de elasticidad de las probetas analizadas

Muestra	Resistencia máxima $\sigma_{\max}$ [MPa]	Módulo de Young [GPa]
M <sub>0</sub>	4,955 ± 0,7	0,144 ± 0,04
M <sub>1</sub>	2,327 ± 0,42	0,067 ± 0,01
M <sub>2</sub>	1,469 ± 0,3	0,041 ± 0,009
M <sub>3</sub>	2,604 ± 0,25	0,072 ± 0,011

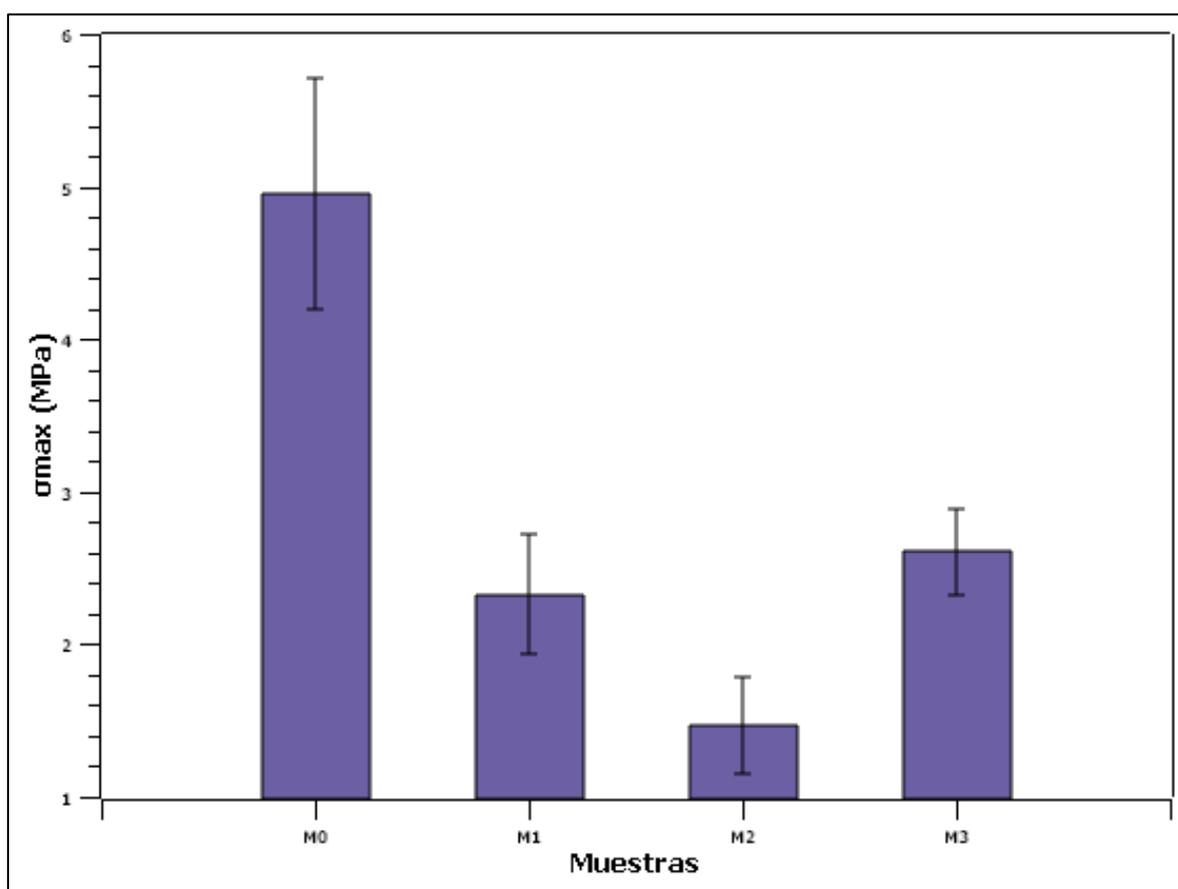


Figura 31: Representación gráfica de la resistencia máxima obtenida a tracción para las probetas de cartón

Como podemos ver en la representación en la figura 31, la resistencia a la rotura de la muestra M<sub>2</sub> es la más baja siendo de 1,46 ± 0.3 MPa. Podemos explicar este valor muy bajo de resistencia con la estructura de la malva que tiene una disposición heterogénea de sus fibras según lo que hemos visto en FESEM más exactamente sus fibras no son unidireccionales como lo de la alcachofa o también de maíz.

### 5.4.2. Desgarro

Tabla 6: Resultados del ensayo de desgarro

	<b>Fmax (N)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Fmedia (N)</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>M0</b>	5,346	1,976153	1,6	0,7
<b>M1</b>	2,996	0,666131	0,18	0,098
<b>M2</b>	2,916667	0,359091	1,45	0,4
<b>M3</b>	2,825	0,55486	0,93	0,12

El ensayo de desgarro nos permite cuantificar la fuerza máxima para desgarrar la probeta de papel. Los valores medios observados en la tabla 6 y en la figura 32 revela que, al igual que en el ensayo de tracción, los valores máximos de fuerza son obtenidos en la muestra de referencia M<sub>0</sub>. La homogeneidad de la muestra de cartón sin carga permite de obtener la máxima valor 5,346 N de fuerza y también de fuerza media. Sin embargo, los valores máximos de los papeles con carga son bastante iguales. La fuerza media registrada en el ensayo de desgarro de la probeta M<sub>1</sub> es inferior a los de las otras fibras por la orientación de las fibras y también por la baja concentración de lumen, constituido principalmente por hemicelulosa, que presente la matriz del tallo de alcachofa que mantiene los conjuntos de fibras.

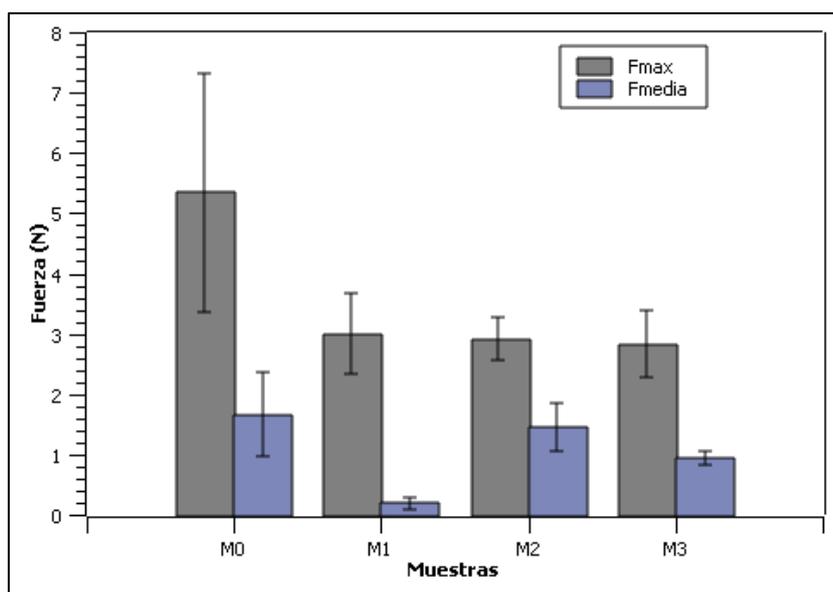


Figura 32: Representación de la fuerza máxima y la fuerza media obtenido por el ensayo de desgarro



# Conclusiones

CONCLUSIONES

## 6. Conclusión

Debido al alto costo de las pastas importadas y a la limitación de los recursos madereros en los países en desarrollo, la tecnología de la pasta no maderera seguirá avanzando a un ritmo rápido. Esto se suma al rápido aumento de la demanda de productos de papel. Se espera que el flujo actual en nuevos molinos continúe durante varias décadas. Como resultado, las materias primas alternativas desempeñan un papel importante en las industrias basadas en papel en los países en desarrollo. El despulpado de residuos agrícolas es de creciente interés debido a factores económicos y ambientales. A lo largo de los años, la investigación en el campo de la pasta no maderera ha dado muchos resultados. En consecuencia, el uso de fibras no madereras en la fabricación de papel no ha sido tan preocupante como en el pasado.

Los recursos obtenidos a partir de residuos de la biomasa no madereros son abundantes y eso permite adaptar un proceso de fabricación específico a esta biomasa para intentar minimizar o eliminar el uso de la fibra de madera.

Estas variedades presentan una morfología diferente a las fibras de plantas primeras y se puede usar como alternativa a la madera en el caso que se extraigan las fibras de celulosa con métodos más ecológicos que permitirían anular el impacto sobre el medio ambiente y también utilizar solventes reutilizables (solventes eutécticos) que presentan ahora un campo de investigación muy amplio en el área de obtención de materiales de origen biomásicos. Según las últimas investigaciones este método permite obtener nano celulosa que se puede integrar en materiales poliméricos y también en papel para facilitar la homogenización de las cargas con la matriz.

En este trabajo se ha utilizado un método artesanal para fabricar las muestras de papel e integrar las cargas, esto puede indicar la facilidad a obtener recursos de biomasa alternativa a la madera que todavía no son explotados en varios campos. Esta estrategia ayudará mucho a implantar una economía circular y disminuir los residuos generados por actividades agrícolas.



# Referencias

REFERENCIAS

## 7. Referencias bibliográficas

- Abd El-Sayed, E. S., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A. M. (2020). Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 35(2), 215–230. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0064>
- Alén, R. (2019). Pulp and paper. In *Encyclopedia of Analytical Science* (Third Edit, Vol. 8). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14014-4>
- Ashori, A. (2006a). Nonwood fibers - A potential source of raw material in papermaking. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 45(10), 1133–1136. <https://doi.org/10.1080/03602550600728976>
- Ashori, A. (2006b). Nonwood fibers - A potential source of raw material in papermaking. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 45(10), 1133–1136. <https://doi.org/10.1080/03602550600728976>
- Asif, M. (2009). Sustainability of timber, wood and bamboo in construction. In *Sustainability of Construction Materials* (pp. 31–54). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.31>
- Bajpai, P. (2021a). Advantages and disadvantages of using nonwood fiber for papermaking. *Nonwood Plant Fibers for Pulp and Paper*, 211–215. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821800-6.00012-0>
- Bajpai, P. (2021b). Problems associated with the use of nonwood fibers and how they are approached. *Nonwood Plant Fibers for Pulp and Paper*, 83–97. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821800-6.00005-3>
- Biermann, C. J. (1996a). Paper and Its Properties. *Handbook of Pulping and Papermaking*, 158–189. <https://doi.org/10.1016/b978-012097362-0/50011-x>
- Biermann, C. J. (1996b). Papermaking Chemistry. *Handbook of Pulping and Papermaking*, 438–462. <https://doi.org/10.1016/b978-012097362-0/50026-1>
- Biermann, C. J. (1996c). Pulping Fundamentals. *Handbook of Pulping and Papermaking*, 55–100. <https://doi.org/10.1016/b978-012097362-0/50007-8>

- Biermann, C. J. (1996d). Wood and Fiber Fundamentals. *Handbook of Pulping and Papermaking*, 13–54. <https://doi.org/10.1016/b978-012097362-0/50006-6>
- Boeykens, S. (2006). De la naturaleza a la mesa. Procesos para la producción de papel y pulpa. *Revista Encrucijadas UBA*, 38, 36–38.  
[http://www.uba.ar/encrucijadas/agosto\\_6/nota-tapa.htm#3](http://www.uba.ar/encrucijadas/agosto_6/nota-tapa.htm#3)
- Capron, I., Rojas, O. J., & Bordes, R. (2017). Behavior of nanocelluloses at interfaces. In *Current Opinion in Colloid and Interface Science* (Vol. 29, pp. 83–95). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2017.04.001>
- Castelló, R., Moral, A., & Ballesteros, M. (2016). Cellulose from algae as a promising alternative for papermaking. *Biosaia: Revista de Los Másteres de Biotecnología Sanitaria y Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria*, 4(5), 2016.  
<https://www.upo.es/revistas/index.php/biosaia/article/view/1821>
- De, D., Naga Sai, M. S., Aniya, V., & Satyavathi, B. (2021). Strategic biorefinery platform for green valorization of agro-industrial residues: A sustainable approach towards biodegradable plastics. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125184.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125184>
- Doherty, W. O. S., Mousavioun, P., & Fellows, C. M. (2011). Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.022>
- Eugenia Eugenio, M., Ibarra, D., Martín-Sampedro, R., Espinosa, E., Bascón, I., & Rodríguez, A. (2019). Alternative Raw Materials for Pulp and Paper Production in the Concept of a Lignocellulosic Biorefinery. *Cellulose*.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.90041>
- Gellerstedt, G. L. F., & Henriksson, E. G. (2008). Lignins: Major sources, structure and properties. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, 201–224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00009-0>
- Ghaffar, S. H., & Fan, M. (2013). Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 57, pp. 264–279). Pergamon.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.07.015>

- Glesk, M. M. (1996). Total quality management. *Flexo*, 21(1), 31.  
<https://doi.org/10.1097/00004010-199523000-00003>
- Goldstein, I. S. (1983). Acid Processes for Cellulose Hydrolysis and Their Mechanisms. In *Wood and Agricultural Residues: Research on Use for Feed, Fuels, and Chemicals*. ACADEMIC PRESS, INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-654560-9.50021-4>
- Gregory, A., & Bolwell, G. P. (1999). Hemicelluloses. In *Comprehensive Natural Products Chemistry* (pp. 599–615). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-091283-7.00084-9>
- Habibi, Y. (2014). Key advances in the chemical modification of nanocelluloses. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 43, Issue 5, pp. 1519–1542). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c3cs60204d>
- Hammett, A. L., Youngs, R. L., Sun, X., & Chandra, M. (2001). Non-wood fiber as an alternative to wood fiber in China's pulp and paper industry. *Holzforschung*, 55(2), 219–224. <https://doi.org/10.1515/HF.2001.036>
- Jahan, M. S., Gunter, B. G., & Rahman, A. F. M. A. (2009). Substituting Wood with Nonwood Fibers in Papermaking: A Win-Win Solution for Bangladesh. *Bangladesh Development Research Working Paper Series (BDRWPS) BDRWPS No. 4*, 4.
- Jahan, M. S., Gunter, B. G., & Rahman, A. F. M. A. (2011). Substituting Wood with Nonwood Fibers in Papermaking: A Win-Win Solution for Bangladesh. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1322292>
- Klemm, D., Cranston, E. D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S. A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T., Nietzsche, S., Petzold-Welcke, K., & Rauchfuß, F. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. In *Materials Today* (Vol. 21, Issue 7, pp. 720–748). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.02.001>
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358–3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>

- Kozłowski, R., & Helwig, M. (1998). Lignocellulosic Polymer Composites. In *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0112-5\\_60](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0112-5_60)
- le Gars, M., Douard, L., Belgacem, N., & Bras, J. (2020). Cellulose Nanocrystals: From Classical Hydrolysis to the Use of Deep Eutectic Solvents. In *Smart Nanosystems for Biomedicine, Optoelectronics and Catalysis*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89878>
- Letter, N. (n.d.). *Non-Wood Fiber for Papermaking*.
- Liu, Z., Wang, H., & Hui, L. (2018). Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers. In *Pulp and Paper Processing*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79017>
- Lora, J. H. (2008). Industrial commercial lignins: Sources, properties and applications. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, 225–241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00010-7>
- Marchessault, R. H., Malhotra, S. L., Jones, A. Y., & Perovic, A. (1983). Wood Explosion Process: Characterization and Uses of Lignin/Cellulose Products. In *Wood and Agricultural Residues: Research on Use for Feed, Fuels, and Chemicals*. ACADEMIC PRESS, INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-654560-9.50026-3>
- Mariano, M., el Kissi, N., & Dufresne, A. (2014). Cellulose nanocrystals and related nanocomposites: Review of some properties and challenges. In *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* (Vol. 52, Issue 12, pp. 791–806). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/polb.23490>
- Marrakchi, Z., Khiari, R., Oueslati, H., Mauret, E., & Mhenni, F. (2011). Pulping and papermaking properties of Tunisian Alfa stems (*Stipa tenacissima*)-Effects of refining process. *Industrial Crops and Products*, 34(3), 1572–1582. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.05.022>
- Maryana, R., Jatmiko, T. H., Prasetyo, D. J., Rizal, W. A., Suwanto, A., Praharasti, A. S., Indrianingsih, A. W., Anwar, M., & Rizaluddin, A. T. (2019a). Evaluation of high purity cellulose production from pretreated various agricultural biomass

- wastes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 251(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/251/1/012001>
- Maryana, R., Jatmiko, T. H., Prasetyo, D. J., Rizal, W. A., Suwanto, A., Praharasti, A. S., Indrianingsih, A. W., Anwar, M., & Rizaluddin, A. T. (2019b). Evaluation of high purity cellulose production from pretreated various agricultural biomass wastes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 251(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/251/1/012001>
- Misko, D. (2012). Environmental impact. *Architectural Digest*, 69(5), 42.
- Monteiro, S. N., Margem, F. M., Margem, J. I., de Souza Martins, L. B., Oliveira, C. G., & Oliveira, M. P. (2014). Infra-red spectroscopy analysis of malva fibers. *Materials Science Forum*, 775–776, 255–260.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.775-776.255>
- Muzzy, J. D., Roberts, R. S., Fieber, C. A., Faass, G. S., & Mann, T. M. (1983). Pretreatment of Hardwood By Continuous Steam Hydrolysis. In *Wood and Agricultural Residues: Research on Use for Feed, Fuels, and Chemicals*. ACADEMIC PRESS, INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-654560-9.50023-8>
- Pennells, J., Godwin, I. D., Amiralian, N., & Martin, D. J. (2020). Trends in the production of cellulose nanofibers from non-wood sources. *Cellulose*, 27(2), 575–593. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02828-9>
- Rousu, P., Rousu, P., & Anttila, J. (2002). Sustainable pulp production from agricultural waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 35(1–2), 85–103.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00124-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00124-0)
- Rullifank, K. F., Roefinal, M. E., Kostanti, M., Sartika, L., & Evelyn. (2020). Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 845(1).  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/845/1/012005>
- Saeed, H. A. M., Liu, Y., & Chen, H. (2018). Exploring Sudanese agricultural residues as alternative fibres for pulp and paper manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/368/1/012030>

- Suhas, Gupta, V. K., Carrott, P. J. M., Singh, R., Chaudhary, M., & Kushwaha, S. (2016). Cellulose: A review as natural, modified and activated carbon adsorbent. In *Bioresource Technology* (Vol. 216, pp. 1066–1076). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.106>
- Thakur, V. K. (2014). Lignocellulosic Polymer Composites. In V. K. Thakur (Ed.), *Lignocellulosic Polymer Composites: Processing, Characterization, and Properties* (Vol. 9781118773). John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781118773949>
- Varshney, V. K., & Naithani, S. (2011). Chemical Functionalization of Cellulose Derived from Nonconventional Sources. In *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites* (pp. 43–60). Springer Berlin Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_2)