



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
FACULTAD DE INGENIERIA

# Valorización de la madera de Pino mediante la producción de pulpa para papel de embalaje

**Autora: Ing. Viviana Palombo**

**Montevideo, Uruguay**

**2021**





UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
FACULTAD DE INGENIERIA

Tesis para obtener al título de  
Magíster en Ingeniería Química

# Valorización de la madera de Pino mediante la producción de pulpa para papel de embalaje

**Autora: Ing. Viviana Palombo**

**Directores de tesis: Msc. Leonardo Clavijo y Msc. María Noel Cabrera**

**Director académico: Dr. Andrés Dieste**

**Montevideo, Uruguay**

**2021**



ISSN 1688-2792

**Viviana Palombo**

Tesis de Maestría en Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo, Uruguay, 2021

*“La ciencia más útil es aquella cuyo fruto es el más comunicable”*

Leonardo Da Vinci.

## **Agradecimientos**

En primera instancia quiero agradecer a mis tutores de tesis, María Noel Cabrera y Leonardo Clavijo, por haberme guiado en el proceso, por sus consejos y su infinita paciencia.

A mi director académico, Andrés Dieste, que me alentó a dar este pasó en mi formación.

A Norberto Cassella, por compartir su experiencia y brindarme nuevas perspectivas.

A los integrantes del Instituto de Ingeniería Química.

A todos los compañeros del grupo de Ingeniería de procesos forestales. A Rodrigo, Nacho, Leandro y Fabián, quienes me apoyaron en mi crecimiento profesional y personal.

Al Laboratorio Tecnológico Uruguayo, por haberme permitido usar las instalaciones y a todo el personal, por hacer que mi estancia allí fuera de lo más amena. A Javier Doldán, Ismael Fariña y Sebastián Quagliotti, por el tiempo que me dedicaron.

A mis amigos. A Florencia, Antonella, Mariana, Jimena y Jonathan, por ser mi faro y acompañarme en esta travesía.

## Resumen

En el año 2017, la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP) llevó adelante un trabajo con el fin de conseguir un mejor desarrollo del complejo industrial maderero-forestal-celulósico, en el cual el grupo de Ingeniería de Procesos Forestales participó como contrapartida técnica. En dicho estudio se encontró que para potenciar el desarrollo de la madera de pino es necesario un procesamiento integral. Como una de las opciones se evaluó que es económicamente rentable la instalación de una planta de papel de embalaje, que produzca 330.000 toneladas anuales de pulpa de celulosa marrón a partir de madera de pino con el método kraft.

La madera de pino fue seleccionada como materia prima debido a que existe acumulación en las plantaciones sin destino comercial. Actualmente se emplea una pequeña fracción de ellas (turno final), para la producción de madera aserrada y productos de ingeniería de madera, como láminas de contrachapado con bajo valor agregado.

Las industrias de transformación mecánica de madera producen un gran volumen de subproductos en forma de chips, con valor agregado casi nulo, los cuales son utilizados exclusivamente como biomasa para la producción de energía eléctrica. El 85 % de estos chips, presentan una distribución de tamaño adecuado para ser utilizados como materia prima del proceso kraft.

La madera de raleo, generada propiamente del manejo forestal, tampoco presenta destino comercial.

La madera de raleo, los chips subproductos de aserradero y la madera de turno final, presentan composiciones químicas similares.

La producción de papel de embalaje se ve incrementada por el aumento en el consumo de los productos a nivel mundial. Esto se debe a una mejora en la calidad de vida, que permite el acceso a nuevos productos y el desarrollo del mercado internacional, en el cual se utiliza un volumen importante de empaques, sumado a una tendencia hacia el uso de materiales biodegradables.

Esta tesis hace foco en analizar condiciones de cocción y las propiedades mecánicas de la pulpa marrón, como principal insumo para la producción de papel de embalaje, a partir de madera de pino uruguay. En los siguientes ítems se analiza el mercado de pulpa y papel mundial, así como la disponibilidad de madera y la matriz energética en Uruguay. Finalmente se estudian distintas condiciones de cocción, seleccionando aquellas que permitan obtener pulpa marrón y se realizarán pruebas a escala de laboratorio para definir cuál de las condiciones ensayadas produce una pulpa con mejores propiedades.

El trabajo experimental demuestra que es posible producir pulpa kraft marrón (valor de número kappa 80) a partir de las tres materias primas mencionadas. Los chips subproducto de aserradero y la madera de raleo

requieren las mismas condiciones de pulpeo (carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$  y factor H 1.260) mientras que la madera de turno final requiere condiciones más leves (carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$  y factor H 1.080).

Al comparar las muestras de pulpa obtenidas experimentalmente con muestras comerciales, se observa que presentan propiedades papeleras similares. Los grados de refino utilizados (expresados como revoluciones del PFI) permitieron obtener valores de índice de resistencia a la tracción e índice de resistencia al desgarro en las hojas producidas con pulpas experimentales, comparables con valores de las hojas comerciales.

Palabras clave: Pinus taeda, kraft, pulpa marrón, propiedades papeleras

## **Abstract**

In 2017, the Planning and Budget Office (OPP) carried out a study in order to improve the development of the wood-forestry-cellulosic industrial complex, in which the Forest Process Engineering group participated as a technical counterpart. In this study, it was found that to enhance the development of pine wood, comprehensive processing is necessary. As one of the options, the installation of a wrapping paper plant, which produces 330,000 tons per year brown pulp from pine wood with the kraft method, was evaluated as economically profitable.

Pine wood was selected as a raw material because there is accumulation in plantations with no commercial destination. Currently a small fraction is used (final shift), for the production of sawn wood and wood engineering products, such as plywood sheets with low added value.

The mechanical wood transformation industries produce a large volume of by-products in the form of chips, with almost zero added value, which are used exclusively as biomass for the production of electrical energy. 85 % of these chips have a suitable size distribution to be used as raw material in a kraft process.

The thinning wood, generated properly from forest management, does not present a commercial destination either. Thinning wood, sawmill by-product chips, and end-shift wood have similar chemical compositions.

It is possible to produce brown kraft pulp (kappa number value 80) from the three raw materials. Sawmill by-product chips and thinner wood require the same pulping conditions (14 % alkali loading as Na<sub>2</sub>O and 1,260 H factor) while final shift wood requires milder conditions (14 % alkali loading as Na<sub>2</sub>O and factor H 1,080).

The production of wrapping paper is intensified or expanded by the increase in the consumption of the product worldwide. This is due to an improvement in the quality of life, which allows access to new products and the development of the international market, in which a significant volume of packaging is used, added to a trend towards the use of biodegradable materials.

When comparing the experimentally obtained pulp samples with commercial samples, they were found to have similar paper-making properties. The refining grades used (expressed as PFI revolutions) made it possible to obtain values of the tensile strength index and the tear resistance index in the sheets produced with experimental pulps, comparable with values of the commercial sheets.

This thesis focuses on analyzing cooking conditions and the mechanical properties of brown pulp, as the main input for the production of packaging paper, from Uruguayan pine wood. The following items analyze the world pulp and paper market, as well as the availability of wood and the energy matrix in Uruguay. Finally, different pulping conditions will be analyzed,

selecting those that will obtain brown pulp and laboratory-scale tests will be carried out to define which of the tested conditions will produce a pulp with better properties.

Keywords: Pinus taeda, kraft, brown pulp, paper properties

## Tabla de contenido

REVISION DE LITERATURA.....	22
1 Escenario mundial del papel y la pulpa de celulosa .....	22
1.1 Escenario mundial del papel.....	22
1.2 Escenario mundial de la pulpa de celulosa.....	26
2 Disponibilidad de madera y matriz energética de Uruguay .....	32
2.1 Disponibilidad de madera .....	32
2.2 Matriz energética .....	36
3 Química y estructura de la madera .....	39
3.1 Química de la madera.....	40
3.2 Estructura de la madera.....	42
4 Procesos de pulpeo al sulfato o kraft .....	46
5 Propiedades papeleras .....	55
6 Condiciones de pulpeo kraft para la obtención de pulpa marrón.....	63
6.1 Dimensiones de los chips .....	65
6.2 Condiciones utilizadas para la obtención de pulpa kraft marrón a ser blanqueada.....	66
6.3 Condiciones utilizadas para la obtención de pulpa kraft marrón.	70
6.4 Viscosidad .....	74

7	Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	76
	PARTE EXPERIMENTAL .....	81
8	Objetivo de la parte experimental.....	81
8.1	Objetivo general.....	81
8.2	Objetivos específicos.....	81
9	Materiales y métodos .....	83
9.1	Materia prima.....	83
9.2	Chipeado, secado y clasificación.....	85
9.3	Determinación de densidad básica .....	88
9.4	Caracterización fisicoquímica de los chips .....	88
9.5	Selección de las condiciones de cocción.....	89
9.6	Operativa en la cocción .....	91
9.7	Operativa del proceso de refinado.....	94
9.8	Desagregado de la pulpa comercial .....	96
9.9	Medidas realizadas en la pulpa y en el licor negro .....	96
9.10	Propiedades físicas .....	98
9.11	Análisis estadístico para propiedades papeleras.....	101
10	Resultados y discusión.....	102
10.1	Materia prima utilizada.....	102
10.2	Cocción para chips subproducto de aserradero .....	106

10.3	Cocción para madera de turno final y raleo .....	116
10.4	Pulpas comerciales.....	118
10.5	Propiedades papeleras .....	119
10.5.1	Drenabilidad .....	119
10.5.2	Gramaje .....	121
10.5.3	Espesor .....	122
10.5.4	Permeabilidad al aire.....	124
10.5.5	Opacidad.....	126
10.5.6	Resistencia al estallido.....	128
10.5.7	Resistencia al desgarro .....	129
10.5.8	Resistencia a la tracción .....	131
11	Cálculos preliminares para una planta de pulpa kraft marrón de pino .....	134
12	Conclusiones.....	139
13	Bibliografía .....	143

## Lista de Figuras

Figura 1. Producción de distintas clases de papel y cartón en el mundo (FAO, 2019). .....	24
Figura 2. Producción de papel y cartón en distintas regiones del mundo (FAO, 2019) .....	25
Figura 3. Producción de madera de eucalipto en Uruguay para la producción de pulpa (Boscana & Boragno, 2020).....	30
Figura 4. Producción de madera de pino en Uruguay para la producción de pulpa (Boscana & Boragno, 2020).....	31
Figura 5. Proyección de la oferta de madera con destino a la transformación mecánica en miles de m <sup>3</sup> (Uruguay XXI, 2016) .....	33
Figura 6. Clasificación de madera aserrada según su corte (Artonic, 2020) (modificado). .....	34
Figura 7. Superficie planta en ha en Uruguay para madera de pino y eucaliptus. (Uruguay XXI, 2016) .....	35
Figura 8. Distribución de la matriz energética de Uruguay en el año 2020, según la fuente de generación (Administración del Mercado Eléctrico, 2020).....	37
Figura 9. Energía obtenida a partir de distintas fuentes de biomasa (Ministerio de Industria, 2021).....	38
Figura 10. Estructura de la fibra (Koch, 2006) .....	42
Figura 11. Estructura de la madera (Díaz, 2007).....	43

Figura 12. Ensayo de resistencia a la tracción. Las flechas indican el sentido en el cual se ejerce la fuerza.....	58
Figura 13. Ensayo de resistencia al desgarro. Las flechas indican el sentido en el cual se ejerce la fuerza.....	60
Figura 14. Muestra ensayada con resistencia al estallido. Las flechas indican el sentido en el cual se ejerce la fuerza.....	61
Figura 15. Muestra de chips subproducto del proceso de aserrado .....	83
Figura 16. Trozas y ramas provenientes de árboles de turno final y raleo .....	84
Figura 17. Muestras de pulpa comercial “Low Kappa” y “Light Colour” ...	85
Figura 18. Secador de bandejas con chips.....	86
Figura 19. Tamiz de clasificación de chips con medidas de las bandejas utilizadas.....	87
Figura 20. Digestor con y sin cápsulas de cocción .....	91
Figura 21. Bolsas de tela con pulpa luego de drenarse durante 24hs. ...	94
Figura 22. Discos del refinador. ....	95
Figura 23. Observación al microscopio de una muestra de pulpa, posterior al proceso de refinado. ....	95
Figura 24. Homogeneizador y tamiz de pulpa. ....	97
Figura 25. Una hoja cortada en probetas para determinar propiedades papeleras.....	100
Figura 26. Clasificación de chips de aserradero por tamaño .....	103
Figura 27. Valores de rendimiento bruto en función del número kappa.	111

Figura 28. Hojas manuales. Al medio y a la izquierda muestras comerciales, a la derecha muestra producida en el laboratorio .....	118
Figura 29. Valor del índice de resistencia a la tracción en función del índice de resistencia al desgarro .....	133
Figura 30. Diagrama de vector del balance sodio azufre.....	137

## Lista de tablas

Tabla 1. Producción de celulosa en el mundo. Clasificación por proceso y tipo de madera (FAO, 2020). .....	27
Tabla 2. Producción de celulosa en Brasil. Clasificación por proceso y tipo de madera (FAO, 2020). .....	29
Tabla 3. Producción de celulosa en Chile. Clasificación por proceso y tipo de madera (FAO, 2020). .....	30
Tabla 4. Una composición posible del licor blanco (Sixta, et al., 2006) ..	49
Tabla 5. Condiciones de pulpeo kraft para la obtención para pulpa marrón a ser blanqueada con madera de pino.....	66
Tabla 6. Condiciones de pulpeo kraft para la obtención de pulpa marrón con madera de pino .....	70
Tabla 7. Caracterización química de distintas maderas de pino. ....	104
Tabla 8. Valores de pH y álcali residual en el licor negro .....	107
Tabla 9. Valores de rendimiento bruto y número kappa .....	109
Tabla 10. Valores de rechazo y número kappa .....	112
Tabla 11. Valores de viscosidad y número kappa.....	114
Tabla 12. Valores de rendimiento, rechazo, viscosidad y número kappa .....	117
Tabla 13. Drenabilidad como CSF (mL).....	120
Tabla 14. Valores de gramaje (g/ m <sup>2</sup> ) .....	121

Tabla 15. Valor del cociente espesor/gramaje ( $\mu\text{m}/(\text{g}/\text{m}^2)$ ).....	123
Tabla 16. Valor promedio de permeabilidad al aire (s) con error estándar. .....	125
Tabla 17. Valor promedio de opacidad (%) con error estándar.....	127
Tabla 18. Valor promedio del índice de resistencia al estallido ( $\text{kpa}/(\text{g}/\text{m}^2)$ ) con error estándar.....	128
Tabla 19. Valor promedio del índice de resistencia al desgarro ( $\text{mN}/$ ( $\text{g}/\text{m}^2$ )) con error estándar.....	130
Tabla 20. Valor promedio del índice de resistencia a la tracción ( $\text{N}/(\text{g}/\text{m}^2)$ ) con error estándar.....	132
Tabla 21. Composición del licor blanco .....	136

# REVISION DE LITERATURA

## 1 Escenario mundial del papel y la pulpa de celulosa

### 1.1 Escenario mundial del papel

Los primeros registros de papel datan del año 2200 a.c. en Egipto, llevando el nombre de papiro debido al material con el que se producían, la *Cyperos papyrus* planta proveniente de la familia de las ciperáceas que crece a orillas del río Nilo. Durante la época grecorromana el papiro coexistió con el pergamino, el cual se conseguía a partir de pieles de oveja y cabra curtidas (Biermann, 1996) (Real academia española, 2021).

A pesar de que papel existía desde varios siglos antes, el primer proceso de fabricación de papel data del año 105 d.c. en China y se le atribuye a Cai Lun, un consejero imperial del Emperador He de Han, que desarrolló una técnica de fabricación de papel para la escritura de documentos. El uso de papel se limitó a china durante unos 500 años, hasta su expansión por Asia en el año 750 (Biermann, 1996).

Posteriormente el papel llegó a Europa, e Inglaterra fue el primer país en fabricarlo. Durante el siglo XVIII la demanda de papel aumentó, por lo que se buscaron nuevos procesos de fabricación.

En 1884 se desarrolla el proceso de pulpeo kraft o al sulfato y en la década de 1930 se implementa la caldera Tomlinson y el blanqueo con cloro. La incorporación del ciclo de recuperación de químicos les permite a las plantas kraft operar con elevada escala de producción y bajo consumo de químicos, produciendo fibra de buena calidad. Esto provocó que el proceso se convirtiera en líder hasta la actualidad (Sixta, 2006).

En la Figura 1, se observa el periodo entre el año 1961 y 2019, en cual el consumo de papel en el mundo se multiplico por 5. Este crecimiento no fue equitativo entre los distintivos tipos de papel. El papel sanitario presentó crecimiento constante y con la mayor tasa (su producción se multiplicó por 14), aunque solo representa el 8,8 % del total de papel y cartón producido. Esto es debido a la mejora en el bienestar social, que incrementó el consumo de productos sanitarios en países que se encuentran en vías de desarrollo y aumentó significativamente el acceso de la población a papel tisú.

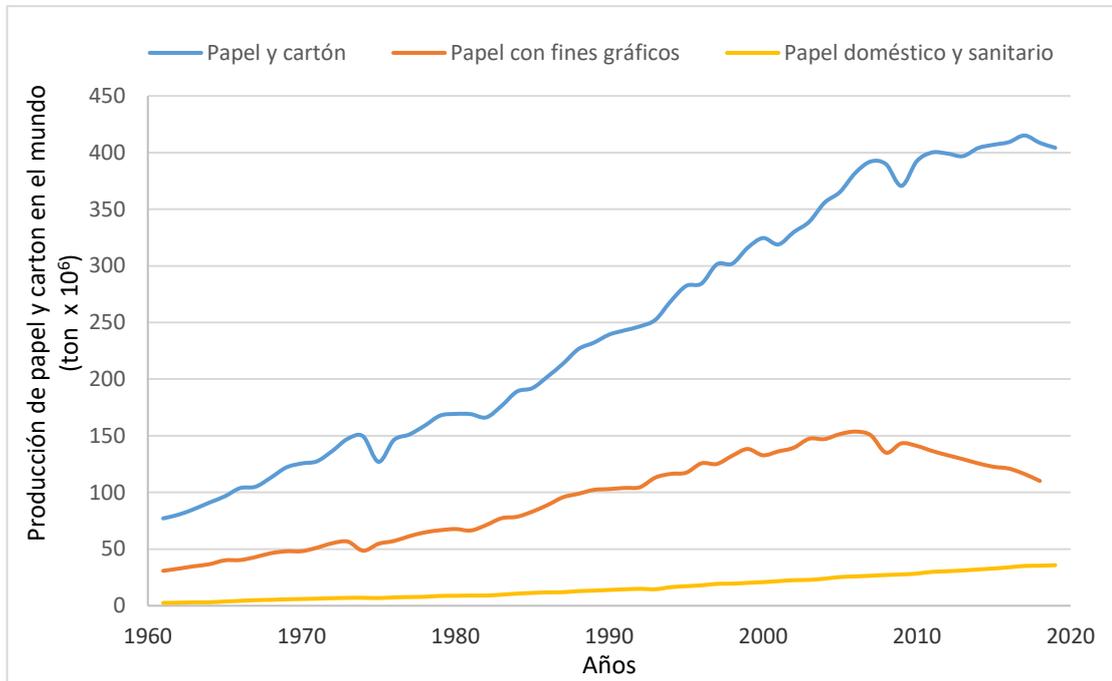


Figura 1. Producción de distintas clases de papel y cartón en el mundo (FAO, 2019).

La producción de papeles y cartones de embalaje se multiplicó por 1,7 desde 1998, debido al aumento en la actividad industrial y el comercio en general. Conjuntamente de una creciente tendencia a la sustitución de empaques plásticos por empaques biodegradables (de papel o cartón), que generan menor impacto en el medio ambiente. Mientras que el papel con fines gráficos tuvo una disminución del 28 % desde 2007 lo que se explica por el mayor acceso a medios digitales debido a los avances tecnológicos (Haggith, et al., 2018) (FAO, 2019).

La producción de papel y cartón en América creció hasta 1995, los siguientes 13 años mantuvo valores de producción en el orden de  $119 \times 10^6$  toneladas anuales, mientras que Europa presentó crecimiento hasta el año 2009 (Figura 2).

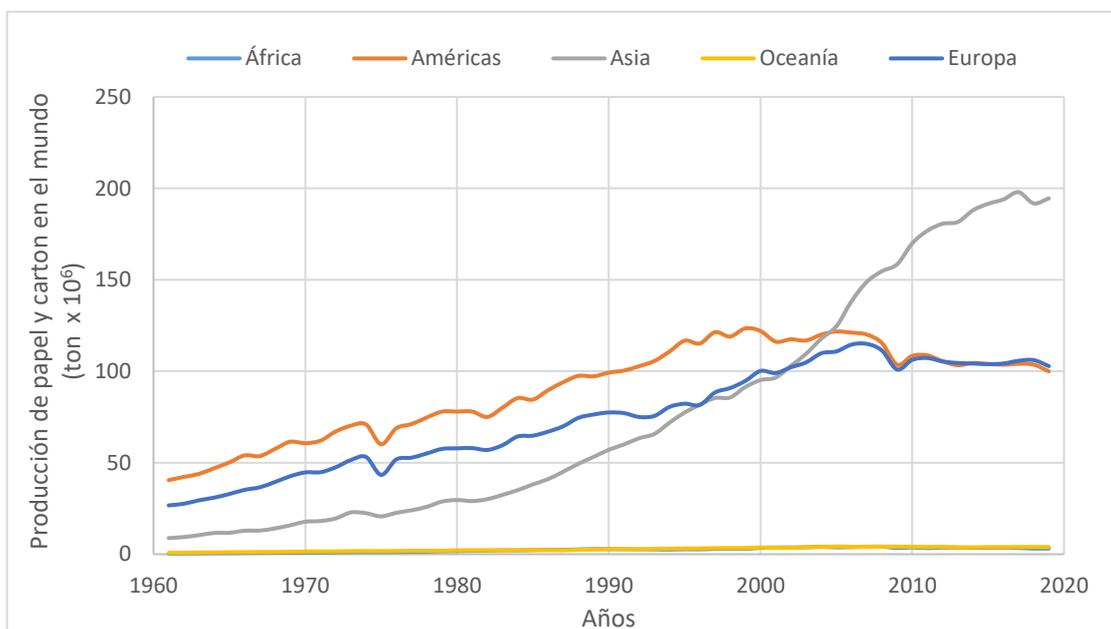


Figura 2. Producción de papel y cartón en distintas regiones del mundo (FAO, 2019)

En 2009, debido a la crisis económica que enfrentaba el mundo y que repercutió fuertemente en las materias primas, América y Europa disminuyeron la producción de papel y cartón a  $109 \times 10^6$  toneladas anuales, valor en el cual se mantienen desde entonces.

En Asia, la producción de papel y cartón no se vió afectada por dicha crisis, manteniendo un crecimiento sostenido desde 1961 y posicionándose como líder con una producción de  $195 \times 10^6$  toneladas anuales. En 1961 Asia

representaba el 13 % de la producción de papel y cartón mientras que en 2019 representaba el 48 %, siendo la región de mayor crecimiento.

## 1.2 Escenario mundial de la pulpa de celulosa

En el mundo se producen  $1,91 \times 10^8$  toneladas por año de pulpa de celulosa, que se divide entre distintos procesos y tipos de madera. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) publicó en 2018 una encuesta a los países productores de pulpa y papel, en la cuales se relevó información del 85 % de la producción mundial (FAO, 2020).

FAO consideró distintos procesos de pulpeo y realizó la clasificación según dos criterios; el primero considera si las plantas realizan algún proceso de blanqueo posterior a la cocción (distinguiendo entre pulpa blanqueada o no blanqueada), el segundo depende de que madera se utilice como insumo, para esto considera coníferas (como pino) o no coníferas (como eucalipto)

Según dicho informe, se fabrican 49.950.500 toneladas por año de pulpa de celulosa (seca al aire o *air dried AD*, esto es con un contenido del 10% de humedad en el producto final) en industrias no integradas a plantas de papel, siendo en su mayoría pulpa química kraft. De la pulpa kraft, el 93 % es pulpa blanqueada, de la cual 46 % es de madera de conífera y 54 % es

de no conífera; mientras que el 7 % es pulpa no blanqueada (FAO, 2020) (Tabla 1).

*Tabla 1. Producción de celulosa en el mundo. Clasificación por proceso y tipo de madera (FAO, 2020).*

<b>Producción mundial</b>			<b>ton AD/año</b>
			<b>Promedio (2017-2020)</b>
Total			49.950.500
Pulpa kraft	Total		45.992.500
	Blanqueada	Total	42.829.500
		Conífera	19.600.500
		No conífera	23.229.000
No blanqueada		3.163.000	
Pulpa sulfito	Total		194.000
	Blanqueada		55.000
	No blanqueada		139.000
Pulpa semi-química			182.000
Pulpa termo-mecánica			622.000
Pulpa mecánica			2.960.000

Además de la pulpa kraft, a nivel mundial existe producción de pulpa química al sulfito (0,4 %), pulpa semi-química (0,4 %), pulpa termo-mecánica (1,3 %) y pulpa mecánica (5,9 %). La pulpa al sulfito se divide en

72 % es pulpa sin blanquear y 28 % es pulpa blanqueada, siendo Rusia el mayor productor (FAO, 2020).

El total de pulpa semi-química y termo-mecánica proviene de madera de conífera. El 57 % de la pulpa semi-química es producida en Australia y el 89 % de la pulpa termo-mecánica en Nueva Zelanda. Mientras que el 74 % de la pulpa mecánica es generada en Canadá (FAO, 2020).

En la región, los principales productores de pulpa de celulosa son Brasil, Chile y Uruguay. Brasil se encuentra al frente de la lista con una producción de 16.195.000 toneladas por año, siendo el 97 % de esta pulpa kraft blanqueada de no conífera, particularmente de eucalipto. La pulpa kraft blanqueada de coníferas representa el 2,5 % de la producción, mientras que la pulpa kraft no blanqueada solo el 0,4 %.

Así mismo, Brasil cuenta con una producción de otros tipos de pulpa: toda la pulpa mecánica (0,6 %) y termo-mecánica (0,4 %) es de madera de conífera, mientras que la totalidad de la pulpa semi-química (0,6 %) es de madera de no conífera (FAO, 2020) (Tabla 2).

Tabla 2. Producción de celulosa en Brasil. Clasificación por proceso y tipo de madera (FAO, 2020).

Brasil		ton AD/año	
		<b>Promedio (2017-2020)</b>	
Total		16.195.000	
Pulpa kraft	Total	15.960.000	
	Blanqueada	Total	15.900.000
		Conífera	400.000
		No conífera	15.500.000
	No blanqueada	Total	60.000
		Conífera	50.000
		No conífera	10.000
Pulpa semi-química		75.000	
Pulpa termo-mecánica		70.000	
Pulpa mecánica		90.000	

En Chile existe una diversidad menor, el total de su producción es pulpa kraft, con un 89 % de pulpa blanqueada y un 11 % de pulpa no blanqueada correspondiendo esta última a madera de conífera (FAO, 2020) (Tabla 3).

Tabla 3. Producción de celulosa en Chile. Clasificación por proceso y tipo de madera (FAO, 2020).

Chile		ton AD/año	
		Promedio (2017-2020)	
Pulpa kraft	Total	4.761.000	
	Blanqueada	Total	4.221.000
		Conífera	1.951.000
		No conífera	2.270.000
	No blanqueada	Total	540.000
		Conífera	540.000
		No conífera	0

En Uruguay se producen 2.630.000 toneladas al año de pulpa química blanqueada de no conífera, en particular de eucalipto. La madera de eucalipto destinada a este fin se encuentra en aumento desde el año 2003, alcanzando los 10.000.000 de m<sup>3</sup> en el año 2017 (Figura 3).

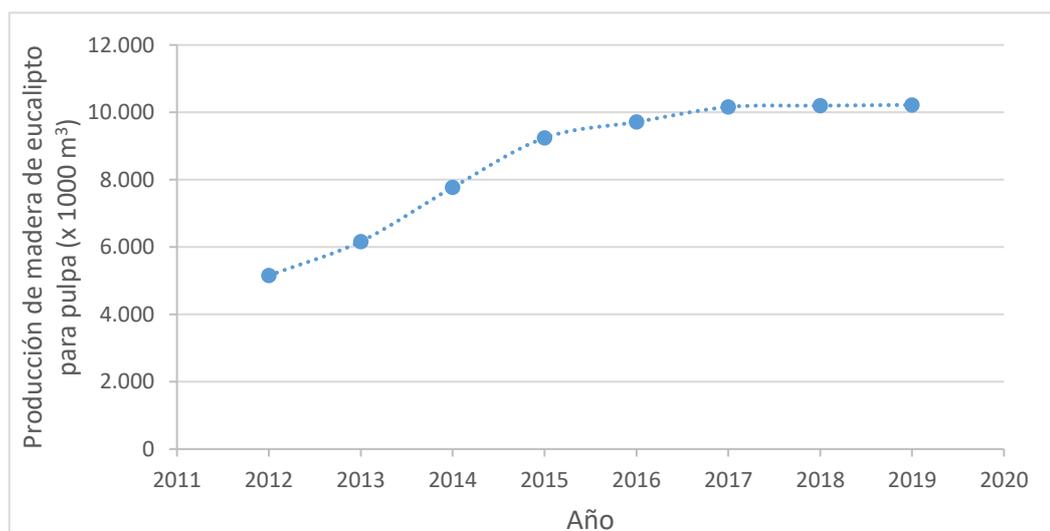


Figura 3. Producción de madera de eucalipto en Uruguay para la producción de pulpa (Boscana & Boragno, 2020)

En la Figura 4 se observa que en Uruguay existió la producción de madera de pino para la industria de la celulosa, que alcanzó un máximo de 100.000 m<sup>3</sup> en el 2009 y es nula desde mediados del 2015 (FAO, 2019) (Boscana & Boragno, 2020). Actualmente no se está explotando este producto. La madera de pino no presenta valor comercial en la industria asociada a la transformación química, pero si en la industria de transformación mecánica.

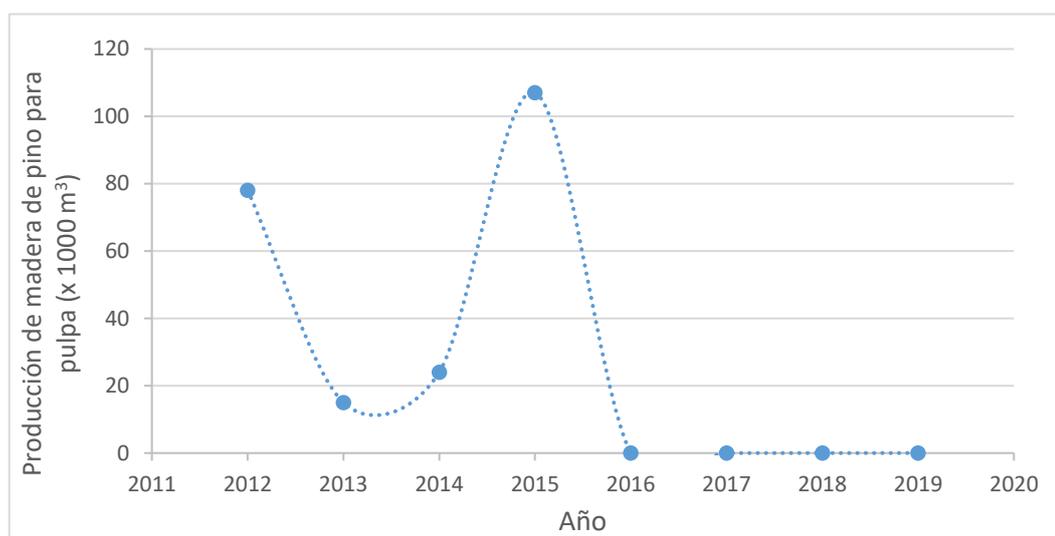


Figura 4. Producción de madera de pino en Uruguay para la producción de pulpa (Boscana & Boragno, 2020).

## 2 Disponibilidad de madera y matriz energética de Uruguay

### 2.1 Disponibilidad de madera

El volumen de madera de pino (conífera) extraída en el año 2017 fue de 2.300.000 m<sup>3</sup> y el de madera de eucalipto (no conífera) fue de 13.600.000 m<sup>3</sup>. La totalidad de madera de pino extraída estuvo destinada a la transformación mecánica, mientras que el volumen de la madera de eucalipto extraída con esta finalidad fue de 900.000 m<sup>3</sup> (*Boscana & Boragno, 2018*).

En la Figura 5 se observa que la oferta de madera para transformación mecánica alcanzará los 4.200.000 m<sup>3</sup> anuales entre los años 2010 y 2030 (Uruguay XXI, 2016). La producción de madera aserrada y chapas ha aumentado desde el año 2006, llegando la madera de pino a duplicar la producción de la madera de eucalipto (FAO, 2019). Esto supone un crecimiento en torno a esta área, generando un volumen mayor de residuos para los cuales resulta interesante encontrarles un uso económico.

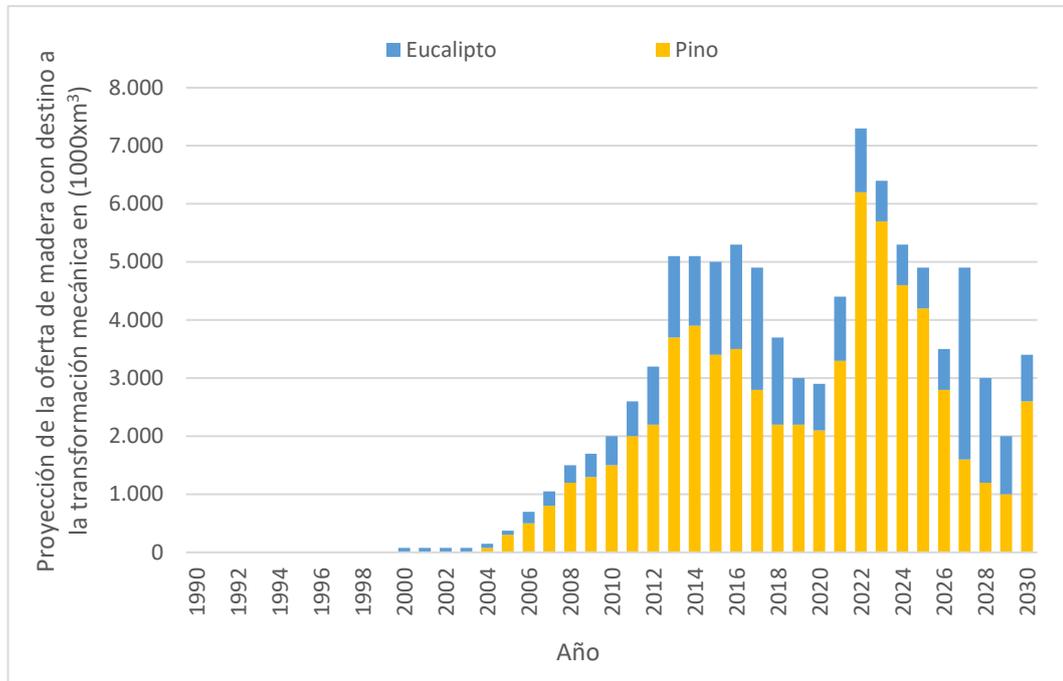
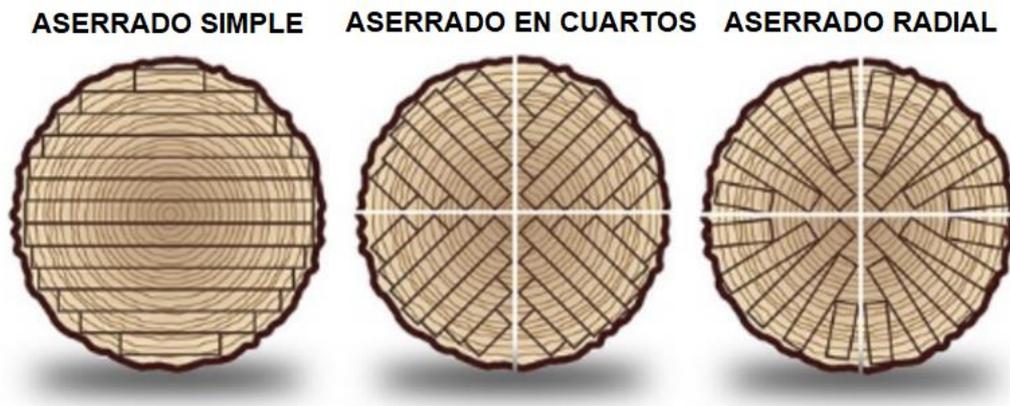


Figura 5. Proyección de la oferta de madera con destino a la transformación mecánica en miles de m<sup>3</sup> (Uruguay XXI, 2016)

Ya que las trozas presentan una forma cónica, se buscan esquemas de corte que maximicen la producción de tablas (Figura 6), de forma de evitar cortes que no poseen valor como tabla aserrada. Esto se traduce en un rendimiento aproximado del 50 % en la obtención de tablas, lo que significa que la mitad de madera que ingresa como materia prima es transformada en residuo (subproducto). Esto produce un volumen de 1.000.000 m<sup>3</sup> anuales por concepto de chips y recortes (Boscana & Boragno, 2018). A esto hay que sumarle el volumen de madera que permanece en campo debido a que la porción utilizable del fuste corresponde a la parte basal

hasta un diámetro con corteza próximo a los 23 cm (MGAP-MIEM-MVOTMA, 2015).



*Figura 6. Clasificación de madera aserrada según su corte (Artonic, 2020) (modificado).*

Otra madera sin destino comercial son las trozas de madera de raleo con diámetro inferior a 23 cm; la generación de madera de raleo está directamente relacionada con las superficies de hectáreas plantadas. La operación de raleo es aquella donde se extraen ejemplares de las plantaciones para disminuir la competencia y que los demás ejemplares tengan mejores condiciones de crecimiento. En general se retiran los árboles de peor forma, dejando los de mayor crecimiento y rectitud del fuste. Se estima que entre los años 2010 y 2030 el volumen de madera por concepto de raleo será de 1.400.000 m<sup>3</sup> anuales (Dieste, 2012).

Otro ejemplo de madera de pino sin valor agregado es el 1.000.000 m<sup>3</sup> de madera sólida en tronco, que fue exportado a china en el año 2017.

En la Figura 7 se observa la superficie plantada en hectáreas de madera de pino y eucalipto hasta el año 2010.

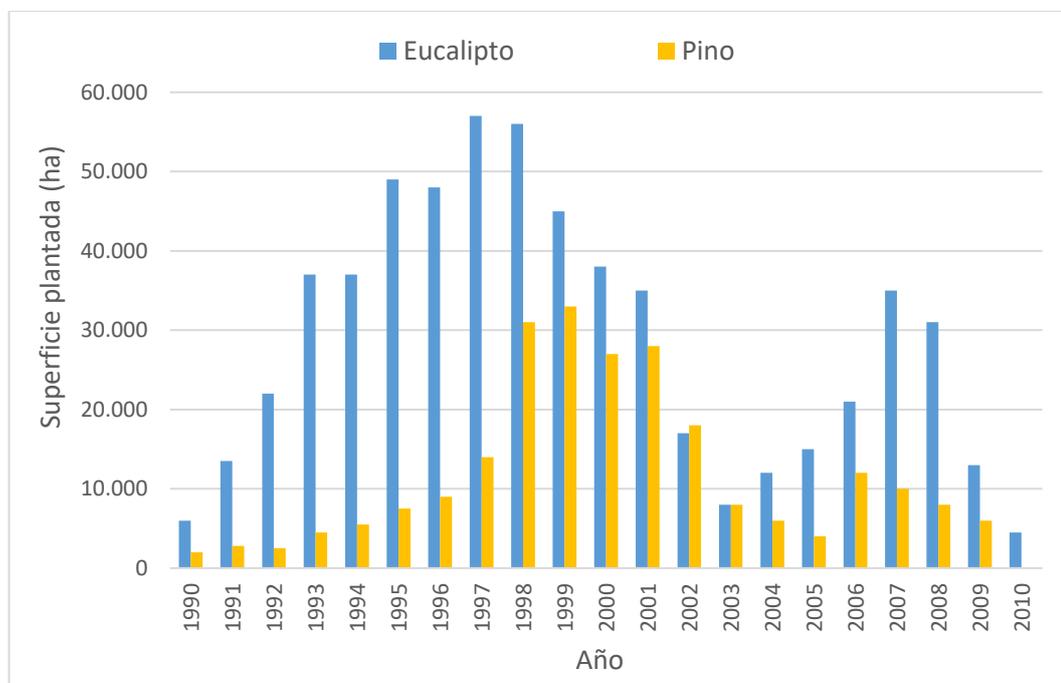


Figura 7. Superficie planta en ha en Uruguay para madera de pino y eucaliptus. (Uruguay XXI, 2016)

La tasa promedio de plantación entre 1990 y 2010 fue de 28.710 ha por año de eucalipto y 11.123 ha por año de pino. Las nuevas plantaciones de pino han ido disminuyendo hasta tener poca importancia. Sin embargo, la superficie plantada asegura disponibilidad de madera por los próximos 20 años (Uruguay XXI, 2018). En el año 2018 la superficie efectiva plantada era de 1.000.000 ha, siendo las principales especies *Eucalyptus grandis* (27 %), *Eucalyptus dunnii* (22 %), *Pinus elliotii* y *Pinus taeda* (juntos 21 %) (Tamosiunas, 2018).

## 2.2 Matriz energética

Al analizar la viabilidad de una planta de celulosa, es necesario tener presente la situación energética del país, ya que, dependiendo del proceso elegido se podría ser un gran consumidor o generador de energía eléctrica. La matriz energética del Uruguay está compuesta por generación hidráulica, generación eólica, generación a partir de biomasa, generación fotovoltaica y generación térmica (Administración del mercado eléctrico, 2019). Los valores acumulados en el año 2020 se observan en la Figura 8 (Administración del Mercado Eléctrico, 2020)

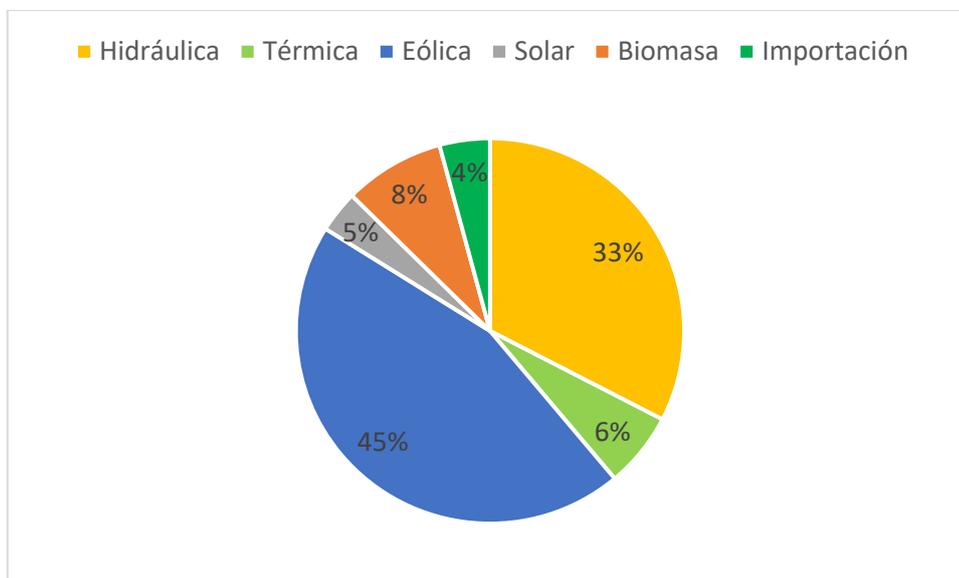


Figura 8. Distribución de la matriz energética de Uruguay en el año 2020, según la fuente de generación (Administración del Mercado Eléctrico, 2020)

El 80 % de la energía producida a partir de biomasa es proporcionada fundamentalmente por la combustión de licor negro de las plantas de pulpeo químico (aportando el 70 % Montes del Plata y el 10 % UPM, con valores diarios de 2000 Mwh y 290 Mwh respectivamente) (Amorín, 2019). Este porcentaje será más significativo cuando se encuentre en funcionamiento la segunda planta de UPM, que se instalará en Paso de los Toros (valor diario proyectado de 310 Mwh).

Otra energía renovable que se encuentra en crecimiento es la eólica, que presentó un salto en el año 2013 a partir del cual su producción se multiplicó por 26 mientras que la energía solar se multiplicó por 5 desde el año 2015 (MIEM, 2019).

La alternativa actual para los chips producidos en los aserraderos es la generación de energía. Como se visualiza en la Figura 9, el volumen de chips, aserrín y residuos forestales utilizado para producir energía se ha mantenido constante desde el año 2013 (Ministerio de Industria, 2021). Considerando que durante varias semanas el precio spot es nulo (MIEM, 2019) y que otras fuentes de generación de energía se encuentran en crecimiento, el uso de chips como fuente de biomasa no sería una opción económicamente sostenible en el tiempo.

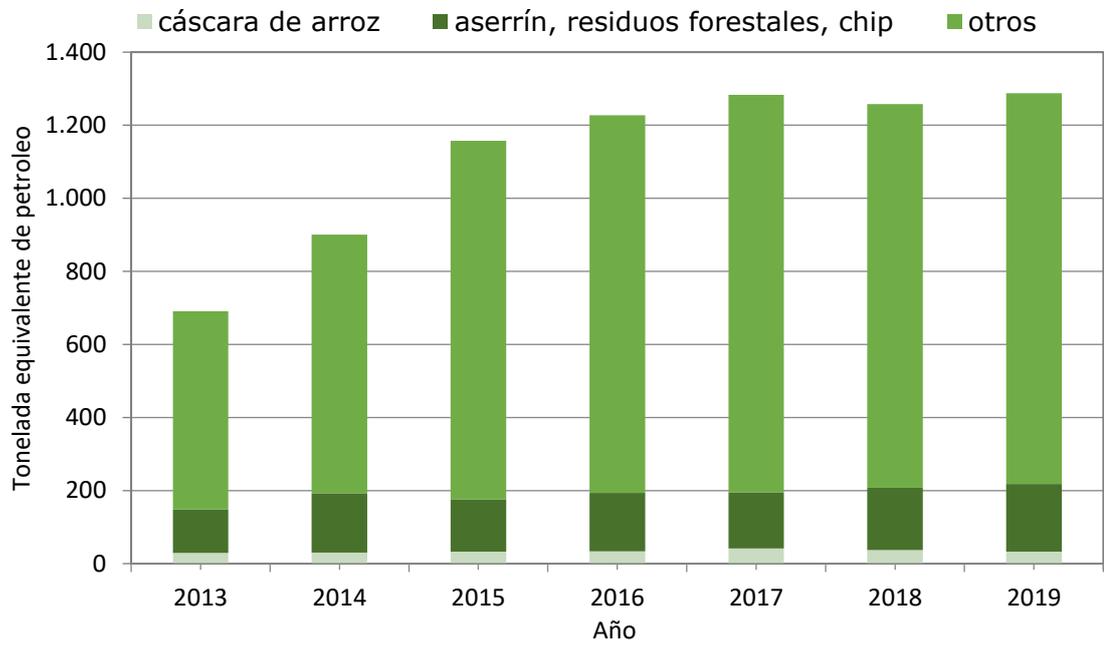


Figura 9. Energía obtenida a partir de distintas fuentes de biomasa (Ministerio de Industria, 2021)

### 3 Química y estructura de la madera

La madera es el material compuesto por biopolímeros de mayor abundancia en la Tierra. Esta puede clasificarse en dos grupos: la madera de fibra larga que es denominada habitualmente como coníferas o gimnospermas y la madera de fibra corta, también conocida como frondosas, latifoliadas o angiospermas. Las primeras se caracterizan por una anatomía basada en un 90 - 95 % de traqueidas y con fibras longitudinales de entre 2,5 a 7 mm de largo y 25 a 60  $\mu\text{m}$  de ancho. Las fibras de esta madera presentan mayor resistencia a la tracción en dirección longitudinal que en dirección radial o tangencial (Biermann, 1996) (Tejedor, 2019).

Por el contrario, las maderas de fibra corta tienen estructuras complejas que incluyen vasos, fibras y traqueidas. Las fibras tienen un largo de 0,9 a 1,5 mm. El papel producido a partir de madera de frondosa presenta mayor suavidad, aunque menor resistencia que el producido a partir de madera de conífera (Biermann, 1996) (Forest Products Laboratory, 2010).

Basado en su nombre vernáculo en inglés, es habitual que en la industria de la madera se llame a coníferas y frondosas a *softwoods* y *hardwoods*, respectivamente.

### 3.1 Química de la madera

La madera presenta una composición elemental de: 49,0 – 50,5 % de carbono, 43,5 – 44,0 % de oxígeno, 5,8 – 6,1 % de hidrógeno y 0,2 – 1,0 % de nitrógeno, además de compuestos inorgánicos en cantidades traza como sodio, potasio, calcio, magnesio y sílice (Koch, 2006) (Pettersen, 1984) (Biermann, 1996). Los elementos químicos mencionados conforman los componentes estructurales de la madera: celulosa, hemicelulosas, lignina y extractivos.

La composición química estructural de la madera depende de la clasificación mencionada (coníferas o frondosas). En el caso de frondosas el contenido de celulosa es de 40 – 50 %, de hemicelulosas de 15 – 35 % y de lignina de 18 – 25 % mientras que para coníferas el contenido de celulosa es de 37 – 50 %, el de hemicelulosas es de 20 – 30 % y de lignina 25 – 35 % (Koch, 2006) (Sjöström & Alén, 1999) (Biermann, 1996).

La celulosa está formada por unidades repetidas de celobiosa (dos unidades de glucosa rotadas 180°) unidas por enlace glicosídico 1 – 4, lo que le confiere una estructura lineal. Las unidades de glucosa forman puentes de hidrógeno intramolecular e intermolecular por lo que en la molécula de celulosa coexisten dos tipos de estructura: una cristalina (que brinda soporte) y otra amorfa (que le permite cierta flexibilidad a la estructura).

Las hemicelulosas son polisacáridos ramificados de distintos monómeros (hexosas como manosa, galactosa, glucosa y pentosas como xilosa y arabinosa). Las frondosas tiene principalmente xilanos mientras que las coníferas tienen menor cantidad de xilanos y mayor proporción de glucanos y mananos. Las hemicelulosas son no cristalinas y son hidrofílicas, siendo una de sus funciones actuar como unión entre la celulosa y la lignina. Su presencia es importante en el papel ya que mejora las propiedades de resistencias mecánicas del papel (Biermann, 1996).

La lignina es un polímero aromático amorfo tridimensional. Aporta resistencia (mecánica y antimicrobiana) a la estructura. Es hidrofóbica, por lo que junto con las hemicelulosas regulan el contenido de agua (Biermann, 1996).

Los extractivos son un conjunto de compuestos de distintos pesos moleculares, que pueden ser extraídos (son solubles) en agua caliente o solventes orgánicos, los cuales cumplen diversas funciones metabólicas. Los extractivos afectan la química, biología y física del árbol, le confieren durabilidad y resistencia a la madera, así como color y olor característicos. El tipo y cantidad de extractivos varía según la especie, sección del árbol y condiciones de crecimiento (Koch, 2006).

### 3.2 Estructura de la madera

La estructura de la pared celular se compone de tres partes: lumen (W), pared primaria (P), pared secundaria (S) y lámina (o laminilla) media (ML) (Figura 10). La pared primaria está compuesta de microfibrillas de celulosa dispuestas de manera irregular, es donde se encuentra mayoritariamente la celulosa amorfa. La pared secundaria se divide en 3 secciones (interna S3, intermedia S2 y externa S1), siendo S2 la que presenta mayor espesor, de 1 a 5  $\mu\text{m}$ , y mayor cantidad de celulosa cristalina. La lámina media funciona como aglutinante entre fibras y es donde el porcentaje de lignina es más elevado.

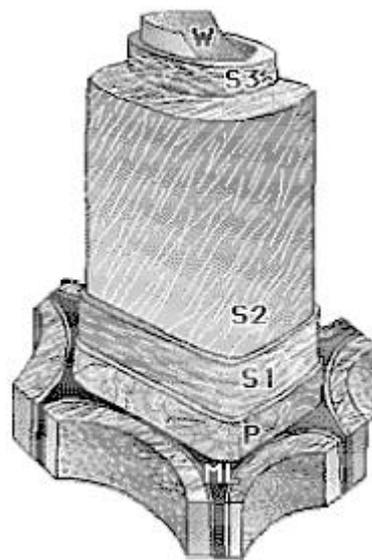


Figura 10. Estructura de la fibra (Koch, 2006)

En cuanto a su estructura, el fuste de un árbol se encuentra formado por anillos concéntricos de distintos materiales. Visto desde el exterior se encuentra la corteza o floema, cambium vascular, albura y duramen (xilema secundario) y médula (Figura 11). La corteza exterior es el anillo más externo y su función es dar soporte y protección. En la corteza interior se da el transporte de azúcares y productos de la fotosíntesis, desde las hojas hacia la raíz. (Forest Products Laboratory, 2010).

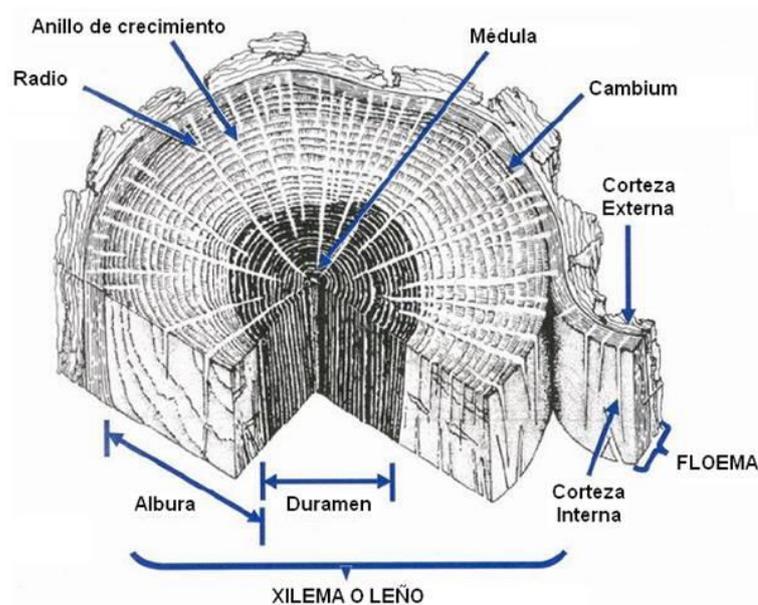


Figura 11. Estructura de la madera (Díaz, 2007).

La corteza comprende hasta un 5 % del volumen de los rolos para pulpa y típicamente está compuesta por 10 – 30 % de extractivos, 15 – 45 % de celulosa, 15 – 40 % de lignina, además de extractivos, como taninos (Biermann, 1996).

El cambium vascular es un fino anillo entre la corteza interior y la albura cuya función es generar los tejidos que forman la madera, floema hacia el exterior y xilema hacia el interior. El xilema, cuya función es dar estructura y soporte al árbol, además de permitir el traslado de agua desde las raíces a las hojas, está compuesto por albura y duramen (Koch, 2006).

La albura tiene como función principal la conducción de agua y nutrientes, almacenamiento y síntesis de sustancias, y la formación del duramen. El duramen es la parte interior del xilema y se forma mediante el proceso de duraminización (utilizando azúcar, almidón y compuestos secundarios). Esto hace que cambie de color y sea rico en extractivos (antifúngicos y antibacterianos) (Biermann, 1996) (Forest Products Laboratory, 2010). El tronco está compuesto de la albura, sección de color más claro, y el duramen de color más oscuro.

Las propiedades de la madera dependen de factores de crecimiento, como la ubicación y el clima en el cual se desarrolló el ejemplar. La longitud de la fibra aumenta conforme se forman los anillos interiores y son más rígidas y gruesas cuando el árbol crece en lugares cálidos y húmedos. También se debe contemplar la formación de nudos, ya que pueden influir en las características de la pulpa. El nudo es la base de la rama en el tronco y si la misma muere el tronco continuará formándose alrededor del nudo encerrando la corteza, por lo que suelen ser más duros, densos y resinosos que el resto del árbol (Biermann, 1996).

La madera juvenil y adulta depende en gran medida de la edad. En árbol adulto, dependiendo de la fracción de este, puede considerarse que en gran medida la base se compone de madera juvenil y la copa de madera madura. Con los anillos del árbol puede distinguir entre madera temprana (se prioriza el crecimiento) o madera tardía (se prioriza el soporte), lo cual depende de la estación del año.

## 4 Procesos de pulpeo al sulfato o kraft

La cocción del proceso kraft se basa en la solubilización de la lignina que conforma la madera, lo que se logra tratándola con agentes químicos a alta temperatura. Además de la disolución de la lignina el proceso busca conservar la mayor cantidad de celulosa y de hemicelulosas intactas para obtener mayor rendimiento (definido como la masa de pulpa seca sobre la masa de madera seca) y el menor contenido de rechazo (definido como la masa de haces de fibra seca sobre la masa total de pulpa seca). El proceso también se enfoca en conservar el mayor largo de fibra posible (el largo de fibra y el contenido de hemicelulosas mejoran las propiedades de papel producido con esa pulpa) (Sixta, et al., 2006).

La madera ingresa a la cocción en forma de chips libres de corteza, ya que, debido a que la corteza tiene fibra más corta, la calidad de la pulpa disminuye, además de provocar coloración marrón (más oscuro) por el alto contenido de extractivos y un mayor consumo de químicos debido al mayor contenido de lignina (Färlin, 2008).

Las dimensiones de los chips determinan la transferencia de calor y de masa en el proceso, así como la remoción de aire y la impregnación del licor, por lo que se busca que el tamaño de estos sea lo más uniforme posible. Si el chip es demasiado corto o fino la fibra estará dañada en exceso (fibra más corta), produciendo una pulpa de menor calidad.

Además, los chips cortos consumen químicos en exceso, produciendo reacciones secundarias, demorando el proceso de deslignificación del resto de los chips (Ressel, 2006).

Por el contrario, si el largo del chip es excesivo se requiere un tiempo de cocción demasiado elevado, ya que los fenómenos fluidodinámicos de remoción de aire e impregnación de licor se dan longitudinalmente en la fibra. Un espesor adecuado también es necesario para obtener una buena impregnación y transferencia de calor. Tomado estos aspectos en cuenta, el largo recomendado para frondosas es de hasta 20 mm y para coníferas es de hasta 40 mm, mientras que el espesor recomendado esta entre 4 y 7 mm (Sixta, et al., 2006) (Kaihonen, et al., 2021).

Al conjunto de agentes químicos utilizados para la cocción se los denomina licor blanco y es una solución que tiene como químicos activos sulfuro de sodio e hidróxido de sodio (Tabla 4).

$$\text{Alcali activo} = [\text{NaOH}] + [\text{Na}_2\text{S}] \quad [1]$$

$$\text{Alcali efectivo} = [\text{NaOH}] + \frac{1}{2}[\text{Na}_2\text{S}] \quad [2]$$

$$\text{Sulfidez (\%)} = \frac{[\text{Na}_2\text{S}]}{[\text{NaOH}] + [\text{Na}_2\text{S}]} * 100 \quad [3]$$

$$\text{Carga de alcali activo (\%)} = \frac{m_{\text{NaOH}} + m_{\text{Na}_2\text{S}}}{m_{\text{madera}}} * 100 \quad [4]$$

El álcali activo se define como la concentración en gramos por litro o porcentaje en solución de hidróxido de sodio ( $[\text{NaOH}]$ ) y sulfuro de sodio ( $[\text{Na}_2\text{S}]$ ), mientras que el álcali efectivo tiene en cuenta la relación estequiométrica entre estos compuestos (ecuaciones 1 y 2). El porcentaje de sulfidez es el cociente entre la concentración de sulfuro de sodio y la concentración de álcali activo, expresado como porcentaje (ecuación 3). La carga de álcali activo se define como la suma de las masas de hidróxido de sodio ( $m_{\text{NaOH}}$ ) y sulfuro de sodio ( $m_{\text{Na}_2\text{S}}$ ), cada cien gramos de madera seca ( $m_{\text{madera}}$ ) (ecuación 4). Todas estas relaciones se calculan como equivalentes de hidróxido de sodio o de óxido de sodio. Para calcular el equivalente de un compuesto se debe dividir el peso molecular del compuesto sobre el peso molecular del hidróxido de sodio (u óxido de sodio), teniendo en cuenta la estequiometría del sodio (Biermann, 1996).

El licor blanco penetra por la fibra, disolviendo en primer lugar la lignina de la pared celular y luego la lignina de la lámina media. Debido a que el ion sulfuro ácido ( $\text{HS}^-$ ) es mejor nucleófilo que el ion hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) (iones provenientes del  $\text{Na}_2\text{S}$  y  $\text{NaOH}$  del licor blanco) la lignina reacciona antes que la celulosa, ya que tiene la capacidad de entrar en resonancia (por el alto contenido de grupos fenólicos), lo cual permite aumentar la selectividad del proceso. Con esto se disuelve generalmente entre el 90 – 95 % de la lignina, el 50 % de las hemicelulosas y entre el 10 – 15 % de celulosa, dependiendo de la extensión de la reacción (Sixta, et al., 2006).

Tabla 4. Una composición posible del licor blanco (Sixta, et al., 2006)

Compuesto	Concentración [g/ L]	
	Como NaOH	Como compuesto
<b>NaOH</b>	90,0	90,0
<b>Na<sub>2</sub>S</b>	40,0	39,0
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	19,8	26,2
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	4,5	8,0
<b>Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,0	4,0
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub></b>	0,6	0,9
<b>Otros</b>		2,5
<b>Álcali total</b>	156,9	170,6
<b>Azufre total</b>	47,1	19,7
<b>Álcali efectivo</b>	110,0	
<b>Álcali activo</b>	130,0	

La deslignificación presenta tres etapas: inicial, principal (bulk) y residual. Aunque depende de la especie de madera, se puede considerar que la fase inicial se da hasta 140 °C y es rápida (10 - 20 minutos). En ésta, reacciona alrededor del 20 % de la lignina y se produce la mayor degradación de hemicelulosas, además durante esta etapa se desprenden compuestos volátiles y se disuelven los extractivos de la madera.

La etapa principal se da entre 140 y 170 °C, es más lenta que la etapa inicial (20 - 80 minutos) y reacciona el 60 % de la lignina. Aunque el hidróxido de sodio se encuentra en concentraciones bajas se produce cierta degradación de la celulosa.

En la etapa residual se da a 170°C, en esta la velocidad de deslignificación disminuye y el proceso se vuelve poco selectivo. En esta etapa es donde se produce mayor degradación de celulosa, debido fundamentalmente a la eliminación beta de los azúcares, que comúnmente se conoce como reacciones de “peeling”. Las mismas se producen sobre la celulosa amorfa y se estabilizan al llegar a la celulosa cristalina, que es más estable (Brännvall, 2009) (Alén, 2000)

El contenido de lignina residual (lignina en la pulpa) se puede determinar de manera indirecta con el valor del número kappa, definido como el volumen (en mL) de permanganato de potasio 0,1 N consumido por 1 g de pulpa seca. Típicamente para pulpa marrón de coníferas que luego va a ser blanqueada el valor del número kappa se encuentra entre 25 – 30 (Sixta, et al., 2006), mientras que está entre 70 - 80 en pulpa marrones para papel de embalaje o cartones. El contenido de lignina remanente en la pulpa (expresado como porcentaje) respecto a la lignina inicial, se puede calcular como un coeficiente por el valor del número kappa (ecuación 5). En el caso de coníferas este coeficiente tiene un valor de 0,152 (Correia, et al., 2019). En el caso de coníferas, la estimación es buena ya que no hay otros compuestos presentes en la pulpa, que se oxiden con el permanganato de potasio (cromóforos, como ácidos hexenurónico) que produzcan una sobre estimación del contenido de lignina.

$$\text{Lignina remanente en la pulpa (\%)} = 0,152 * \text{kappa} \quad [5]$$

En general, la cocción se produce a una temperatura entre 140 y 170 °C, dependiendo de la especie, y junto con el tiempo de cocción determinan el factor H, el cual es un parámetro de control del proceso. El factor H vincula el tiempo de cocción con la temperatura a la cual se lleva a cabo y es un indicador de la velocidad de disolución de la lignina. Geométricamente es el área bajo la curva de velocidad relativa de reacción en función del tiempo. Puede calcularse mediante la expresión de la ecuación 6, para cual los parámetros están determinados expresando la temperatura en grados kelvin. Se requiere valores de factor H entre 1.000 y 1.500 para lograr una cocción completa, dependiendo de la especie de madera, carga de álcali y porcentaje de sulfidez (Sixta, et al., 2006).

$$H = \int_0^t e^{43,2 - \frac{16,113}{T}} \partial t \quad [6]$$

El grado de polimerización de la celulosa se define como el cociente entre el peso molecular de la celulosa y el peso molecular de una unidad de glucosa. Mientras el grado de polimerización de la celulosa natural está en el orden de 10.000, en la pulpa de celulosa marrón se encuentra en el entorno de 1.600.

El grado de polimerización se determina mediante cromatografía de permeación en gel (GPC) que es una cromatografía de exclusión por tamaño, con la que se obtiene el perfil de peso molecular. Consiste en una columna de gel (de poliestireno-divinilbenceno reticulado) que produce distintas canalizaciones para las moléculas de menor tamaño, mientras que las moléculas de mayor tamaño son arrastradas con el solvente. Como las moléculas de distinto tamaño son retenidas tiempos distintos, se puede cuantificar su distribución en la muestra (Biermann, 1996). El grado de polimerización en la pulpa puede estimarse indirectamente a partir de la medida de viscosidad.

Se han propuesto diversas ecuaciones que permiten relación la medida de viscosidad con el grado de polimerización, estimando previamente el contenido de celulosa en la muestra. Esto permite realizar una medida indirecta del grado de polimerización con una técnica más sencilla y económica. Para pulpas con número kappa superior a 60, el valor de viscosidad está en el entorno de 1.300 ml/ g.

Si al finalizar la cocción el pH de la suspensión disminuye de 11, la lignina puede precipitar y si es demasiado alto la pérdida de carbohidratos puede ser importante debido a la hidrólisis alcalina, implicando una disminución de la viscosidad y pérdida de propiedades mecánicas. Por lo tanto, se busca que el álcali residual en el licor negro una vez finalizado el proceso se encuentre entre 2 - 4 g/ L como  $\text{Na}_2\text{O}$ , lo que indica que las condiciones

en las cuales fue realizada la cocción (carga de álcali y factor H) no favorecen las reacciones mencionadas.

Luego de la cocción, las astillas que se encuentran en un reactor presurizado son descargadas a presión atmosférica. Debido a que la mayor parte de la lignina fue disuelta durante la cocción, la estructura tiene menos resistencia mecánica y esta diferencia de presión rompe la matriz y forma una pasta. El punto en el cual las fibras se separan de la matriz de los chips es denominado punto de desfibrilación y se alcanza cuando el porcentaje de lignina disuelta en el licor negro es mayor al 80%. Si el porcentaje de lignina disuelta es menor, es necesario una acción mecánica para que los chips pierdan su forma, ya que la estructura aún presenta buena resistencia (aportada por la lignina residual) (Sixta, 2006).

La acción mecánica es llevada a cabo en un refinador. El refinador puede ser de discos paralelos y contar con un disco estático (también llamado estator) y un disco rotatorio o tener ambos discos rotatorios; otros diseños de refinador cuentan con geometría cónica. En todos los casos, la pasta que sale del digestor es impulsada entre dos placas paralelas que presentan un diseño con ranuras. Las ranuras de las placas permiten que los haces de fibra se desarmen afectando lo menos posible el largo de las fibras. El aumento de presión y temperatura que se genera entre los discos del refinador colaboran a la acción mecánica de este, ya que se ablanda la lignina de la lámina media, facilitando la separación de las fibras.

La pulpa es lavada para separarla del licor reaccionado, al que se lo denomina licor negro, debido a que adquiere un color oscuro al estar compuesto por un elevado porcentaje de lignina disuelta (Krotscheck, 2006)

## 5 Propiedades papeleras

Las propiedades papeleras son un conjunto de medidas físicas, químicas y fisicoquímicas que permiten caracterizar una muestra de papel o cartón. Para realizar estas medidas, se somete la muestra de pulpa a un proceso de refinado y posteriormente se forman hojas manuales.

Para la correcta formación de las hojas, es necesario someter a la pulpa a un proceso de refinado, para lo cual una opción es utilizar un molino PFI durante un determinado número de revoluciones. Consiste en un rotor interno y un estator externo, y la pulpa se coloca entre ambos. El refinador, mediante el rozamiento con las fibras, produce fibrilación externa. Al rozar el rotor con la fibra, se generan fuerzas que rompen los enlaces de la capa externa, dejándolos más disponibles, lo que aumenta el número de enlaces dentro de las hojas. El efecto del rozamiento al cual son sometidas las fibras también daña la integridad de éstas, reduciendo el largo, lo cual resulta perjudicial para algunas propiedades (como la resistencia al desgarro) (Biermann, 1996).

En la producción industrial de papel de embalaje se prefiere el proceso de refinación a consistencia alta a pesar de que implica un consumo de energía mayor, ya que permite el mejor desarrollo de las propiedades de elongación (como la resistencia a la tracción y la resistencia al estallido) y

mejora la permeabilidad al aire de las hojas. En consecuencia, se obtienen hojas más resistentes (Biermann, 1996).

La drenabilidad es una medida de la interacción entre las fibras al formar un entramado. Existen dos indicadores para medirla, el °SR (Schopper-Riegler) o el CSF. El método del CSF (Canadian Standard Freeness) consiste en hacer pasar un volumen de agua conocido a través de una capa de pulpa y medir cuánta agua lo atraviesa. Para el CSF, cuanto menor es el volumen de agua recogido más fuerte es la interacción entre las fibras. El valor de CSF disminuye cuando aumenta el número de revoluciones del PFI, debido al fenómeno de fibrilación externa que ocurre durante la refinación (incremento del área superficial). Cuanto mayor sea el grado de fibrilación de la pulpa, más abiertas están las capas exteriores, lo que le permite a la pulpa formar un mayor número de enlaces con las moléculas de agua (lo que implica mayor retención de agua y más interacción entre las fibras).

Para que las pruebas sean comparables las hojas deben aclimatarse en condiciones controladas. Por norma se utiliza que las mismas estén al menos durante 4 horas a 23 °C y humedad relativa de 50 % (ISO Standard No. 187, 1990), esto es debido de la higroscopía del papel.

Entre las propiedades básicas que se determinan a una hoja de papel se encuentran: el área, la masa y el gramaje. Este último se define como el peso por unidad de área (para papel de embalaje típicamente 40-120 g/ m<sup>2</sup>)

(ISO Standard No. 536, 2019). El papel es compresible, por lo que su espesor se determina como la distancia perpendicular de dos placas planas que aplican una presión superficial de  $1 \text{ kg/ cm}^2$  sobre la muestra. La relación entre el gramaje y el espesor es la densidad del papel, y su inverso, el volumen específico (ISO Standard No. 534, 2011).

El grado de blanco es la propiedad óptica más importante en papeles blancos y de impresión y es utilizado como un parámetro de control del proceso de blanqueo. Se define como la reflectancia de una luz azul (longitud de onda 457 nm) sobre la muestra y se expresa como porcentaje sobre un estándar blanco.

La opacidad (ISO Standard No. 2471, 2008) es el porcentaje de luz absorbida por el papel. Se calcula como la relación entre la reflectancia de la muestra sobre el fondo negro y la reflectancia de una superficie negra estandarizada. El grado de blanco y la opacidad son dos propiedades ópticas que se vuelven más importantes si la aplicación que se le dará al papel requiere buena calidad de impresiones gráficas.

El papel de embalaje debe soportar grandes cargas, por lo que las propiedades más importantes son aquellas que cuantifiquen la resistencia, ya que permiten determinar si el papel puede cumplir su función (proteger el producto embalado) sin dañarse y determinan su vida útil. Dentro de estas, las más relevantes son la resistencia a la tracción y la resistencia al desgarro (Sixta, et al., 2006).

La resistencia a la tracción se determina estirando una muestra de papel a una velocidad de alargamiento constante hasta su ruptura. Es un indicador de la longitud de la fibra y el número de enlaces entre estas, por lo tanto, una medida de su resistencia. Adicionalmente este ensayo permite calcular el estiramiento, que se define como el porcentaje que la muestra se estira hasta su ruptura, y la rigidez a la tracción, que es la capacidad de la hoja de no curvarse al ser sometida a fuerzas de tracción (TAPPI Test Method T 494 om-01, 2006). En la Figura 12 se muestra el ensayo de resistencia a la tracción (Kaihonen, et al., 2021).



*Figura 12. Ensayo de resistencia a la tracción. Las flechas indican el sentido en el cual se ejerce la fuerza*

Durante el ensayo de resistencia a la tracción, las fibras y enlaces no se rompen al mismo tiempo, ya que existe variabilidad dentro de la muestra. La carga máxima que la muestra puede soportar depende de la resistencia individual de cada fibra y la resistencia de los enlaces entre las fibras. Es una propiedad que aumenta con el grado de refinado.

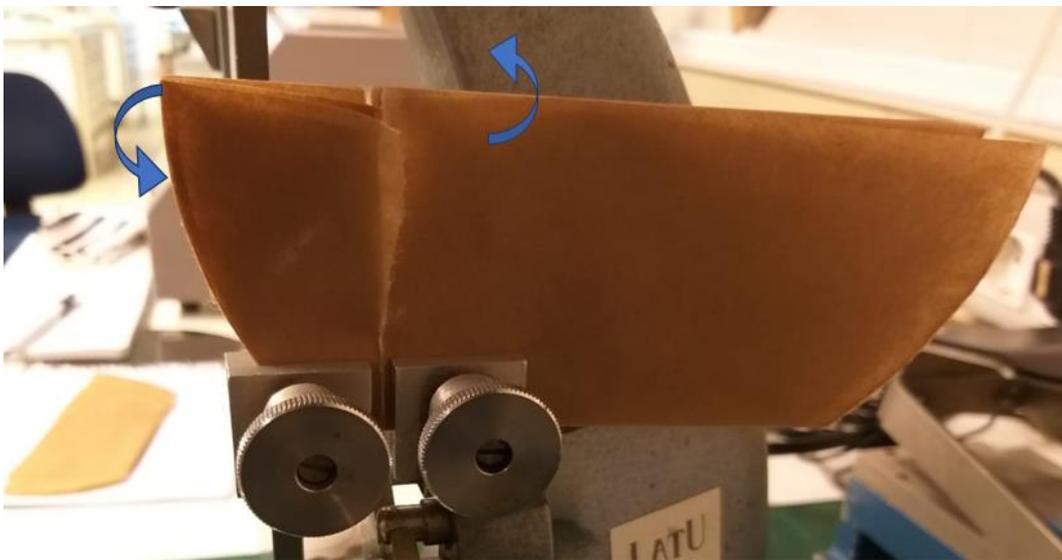
La longitud de ruptura se define como la longitud a la cual se rompe por su propio peso una tira de papel que cuelga sujeta de un extremo, esta debe tener ancho y grosor determinado. La longitud de ruptura puede calcularse a partir de la resistencia a la tracción y el gramaje. Es más común utilizar la absorción de energía de tracción, que es la fracción de energía deformable no elástica (energía disipada) que se determina con el mismo ensayo que la resistencia a la tracción (TAPPI Test Method T 494 om-01, 2006).

La rigidez se define como la resistencia de un papel o cartón a ser plegado en una dirección específica y puede obtenerse por métodos no destructivos como ultrasonido. La velocidad del sonido en un material es proporcional al módulo de Young, esto permite realizar medidas en distintos ángulos, para estimar la orientación de la rigidez a la tracción (Sixta, et al., 2006).

En papeles gráficos o de embalaje, puede ser importante la resistencia al plegado (ISO Standard No. 5626, 1993) que es la capacidad del papel de resistir pliegues. Se calcula generando múltiples dobleces sobre la muestra, bajo una presión determinada hasta su ruptura. La fuerza en dirección Z es la resistencia de los enlaces internos del papel o cartón, (TAPPI Test Method T 569 om-14, 2006) se determina aplicando una carga de tracción en dirección perpendicular al plano del papel.

La resistencia al desgarro (ISO Standard No. 1974, 2012) se denomina a la fuerza requerida para lograr un desgarro de longitud determinada en una hoja, es decir, es la capacidad de hoja de tolerar el fallo. El fallo por

desgarro es un fenómeno que ocurre con cierta frecuencia en la máquina de formación de papel, por lo que las hojas deben presentar buena resistencia al desgarro, para poder formarse adecuadamente. En la Figura 13 se muestra el ensayo de resistencia al desgarro (Kaihonen, et al., 2021).



*Figura 13. Ensayo de resistencia al desgarro. Las flechas indican el sentido en el cual se ejerce la fuerza*

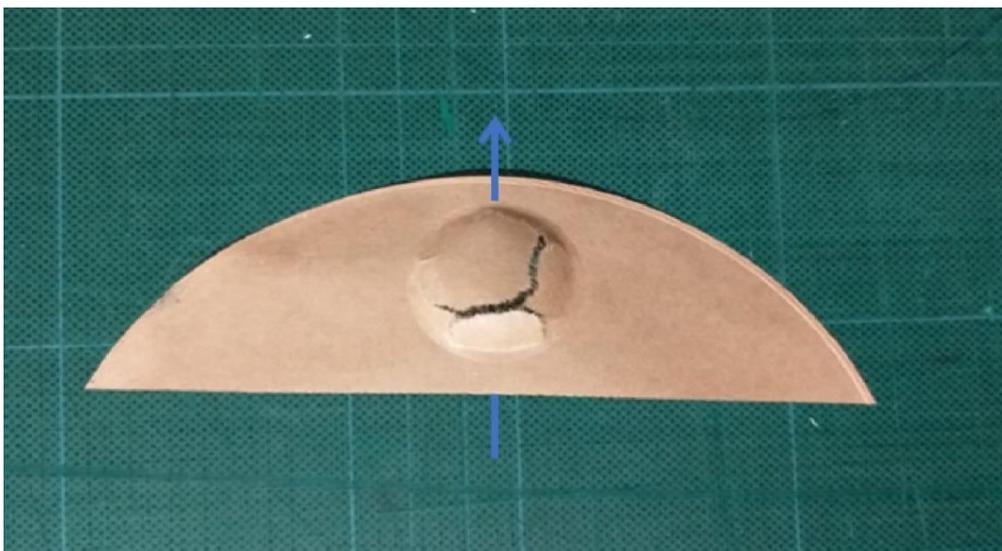
Los factores determinantes para la resistencia al desgarro son la longitud y los enlaces de las fibras. Para que se produzca un desgarro deben romperse los enlaces durante todo el recorrido de una fibra, o bien, romperse una fibra.

Al comienzo del proceso de refinación aumenta la resistencia al desgarro, ya que mejora la capacidad de las fibras de formar enlaces. Luego de cierto punto, la resistencia de la fibra se ve comprometida por el daño que genera

la refinación (disminuye la longitud), lo que implica una disminución de la propiedad.

Los enlaces entre fibras son más resistentes que la integridad de una fibra dañada, por lo que el factor que determina la resistencia al desgarro es el largo de la fibra. Esto permite distribuir mejor la tensión generada durante la medida (ISO Standard No. 1974, 2012).

La resistencia al estallido es de gran importancia en los papeles de embalaje (ISO Standard No. 2758, 2014) y cartones (ISO Standard No. 2759, 2014). La prueba consiste en colocar la muestra en un bastidor circular y estirarla, exponiéndola a presión desde debajo, hasta su ruptura. Es una prueba que permite, mediante una medida simple, generar noción de la resistencia general de la muestra. Una muestra ensayada con resistencia al estallido se muestra en la Figura 14 (Kaihonen, et al., 2021).



*Figura 14. Muestra ensayada con resistencia al estallido. Las flechas indican el sentido en el cual se ejerce la fuerza*

La resistencia a la perforación (ISO Standard No. 3036, 1975), que se calcula como la resistencia de la muestra a la presión ejercida por un cuerpo piramidal en lugar de un diafragma. Este parámetro es de relevancia en cartón y cartón corrugado. Para completar el estándar de cartón corrugado, se determina el aplastamiento de bordes (ISO Standard No. 3037, 2013) (Sixta, et al., 2006).

La resistencia al estallido, la resistencia al desgarró y la resistencia a la tracción, dependen del gramaje. Para poder comparar estos valores se utilizan índices, los cuales se calculan como el cociente entre la resistencia y el gramaje de la muestra. De esta forma se definen el índice de resistencia al estallido, índice de resistencia al desgarró e índice de resistencia a la tracción.

La resistencia al estallido y la tracción deben ser medidas en papeles no dañados, aunque estos parámetros tienen su equivalente en papeles con rupturas, ya que puede ser de interés determinar la resistencia en una muestra ya dañada. La resistencia a la tracción y el estiramiento pueden determinarse en húmedo (ISO Standard No. 3781, 2011), mientras que la resistencia al estallido puede medirse luego de sumergir la muestra en agua (ISO Standard No. 3689, 1983).

## 6 Condiciones de pulpeo kraft para la obtención de pulpa marrón

Como se mencionó en el ítem 4, dependiendo de la sección del árbol, se pueden encontrar distintas proporciones de los diferentes compuestos estructurales de madera, lo que podría producir resultados distintos cuando son sometidos a las mismas condiciones de cocción. Hortling et al. 2001 comparan la deslignificación de madera normal y madera de compresión. La madera de compresión es la que produce cuando el árbol se encuentra sometido a estrés en una dirección (como cuando crece en un terreno inclinado en la ladera de una montaña), por lo que prioriza el soporte frente al crecimiento.

En dicho estudio, la madera normal presenta un valor de número kappa inferior (24,8) y rendimiento superior (45,4 %) al de la madera de compresión (26,3 y 44,7 %), frente a las mismas condiciones de cocción. Aunque estas diferencias son relativamente pequeñas, los autores concluyen que, el contenido de lignina en la pulpa proveniente de madera de compresión es mayor que el de la pulpa de madera normal (Hortling, et al., 2001).

Otra clasificación depende de la edad del árbol, separándose en madera juvenil, de menor edad y diámetro, y madera madura, de mayor edad y destinada a la industria fabricación de productos de ingeniería de madera

para ser utilizados en construcción. Las fracciones menos valorizadas de estas categorías son la madera de raleo y los chips de aserraderos.

En el trabajo de Aziz et al. 2001 ensayan las mismas condiciones de cocción en *Pinus contorta* utilizando tres clasificaciones de madera: troncos con diámetro final inferior a 89 mm, troncos con diámetro inferior a 127 mm y chips de aserraderos. Los valores de número kappa que reportan para los tres tipos de madera son muy similares (71 para troncos con diámetro final inferior a 89 mm, 72 para troncos con diámetro inferior a 127 mm y 71,6 chips de aserraderos). Sin embargo, el valor de rendimiento para los chips de aserraderos (rendimiento 50,7 %) es menor que el que obtienen para las otras clasificaciones de madera, siendo estos similares entre ellos (el rendimiento para troncos con diámetro final inferior a 127 mm es 53,4 % y el rendimiento para troncos con diámetro final inferior a 89 mm es 53,1%) (Aziz, et al., 2001).

Aziz et al. 2001 miden el índice de resistencia al estallido a 3 grados de refinado (entre 4.000 y 15.000 revoluciones). Para: troncos con diámetro final inferior a 89 mm éste índice se encuentra entre 8,4 y 7,2  $\text{kpa m}^2/\text{g}$ , para troncos con diámetro inferior a 127 mm entre 8,1 y 6,7  $\text{kpa m}^2/\text{g}$ , y para chips de aserradero entre 8,6 y 8,0  $\text{kpa m}^2/\text{g}$ . El índice de resistencia al desgarramiento para: troncos con diámetro final inferior a 89 mm está entre 20,5 y 21,5  $\text{mNm}^2/\text{g}$ , para troncos con diámetro final inferior a 127 mm se encuentra entre 16,5 y 17,5  $\text{mNm}^2/\text{g}$ , y para chips de aserradero presenta valores entre 16,5 y 17,5  $\text{mNm}^2/\text{g}$ . La medida del índice de resistencia al

desgarro presenta diferencias significativas para los troncos con diámetro inferior a 89 mm, siendo la muestra con los mayores valores, mientras que el índice de resistencia al estallido es similar para las tres. Los autores concluyen que los valores de índice de resistencia a la tracción obtenidos les confieren a las pulpas experimentales la calidad necesaria para ser utilizadas en la fabricación de empaques (Aziz, et al., 2001).

## 6.1 Dimensiones de los chips

Como se mencionó en el ítem 4, las dimensiones de los chips son importantes para una correcta impregnación y cocción. Martínez Neira 2012 estudió el efecto del sobreespesor (aumento en el espesor) de los chips de *Pinus radiata* en el pulpeo kraft. Dentro de las condiciones que evaluó, concluye que el aumento del espesor produce disminución del rendimiento y aumento del rechazo. Con un sobreespesor del 10 % se da un aumento de 4 puntos en el número kappa, para las mismas condiciones. Al estudiar las propiedades físicas, concluye que no se producen cambios estadísticamente significativos en las medidas de índice de resistencia a la tracción y el índice de resistencia al desgarro, cuando se aumenta el porcentaje de sobreespesor (Martinez Neira, 2012).

## 6.2 Condiciones utilizadas para la obtención de pulpa kraft marrón a ser blanqueada

En la tabla 5 se muestran rangos de condiciones de pulpeo kraft con especies de pino para obtener pulpa marrón a ser blanqueada reportada en la literatura.

Tabla 5. Condiciones de pulpeo kraft para la obtención para pulpa marrón a ser blanqueada con madera de pino

Especie de pino	Carga álcali (%)	Sulfidez (%)	Factor H	Temperatura (°C)	Relación licor-madera	Kappa	Referencia
<i>Pinus radiata</i>	18 <sup>2</sup>	30	800	170	-	28 a 32	(Martinez Neira, 2012)
<i>Pinus taeda</i>	17,7 y 21,2	30	1.000, 1.500 y 2.200	170	4:1	32,8, 23,8 y 19,7	(Shin, et al., 2004)
<i>Pinus nigra</i>	24	30	1.615	170	4:1	24,1 <sup>1</sup>	(Gulsoy & Ozturk, 2015)
<i>Pinus brutia</i>	20	30	1.528	170	4:1	31,8 <sup>1</sup>	(Copur & Tozluoglu, 2008)
<i>Pinus brutia</i>	16 y 18 <sup>2</sup>	25	1.045 y 1.966	170	-	30,3 y 52,5 <sup>1</sup>	(Akgul, et al., 2007)

<i>Pinus tecunu manii</i>	19 <sup>2</sup>	30	1.308	170	4:1	30	(Torres, et al., 2005)
<i>Pinus pseudo strobus L.</i>	18 y 20	20	615 y 1.231	165 y 175	4:1	15,79 a 40,04	(Gabriel-Parra, et al., 2018)

<sup>1</sup>Se consideran los valores de número kappa de las muestras de control

<sup>2</sup>Carga de álcali activa expresada como Na<sub>2</sub>O

Como se observa en la tabla 5, los valores de número kappa reportados para pulpa kraft de pino a ser blanqueada se encuentran entre 15,79 y 52,5 (típicamente entre 20 y 35). Existe mayormente consenso entre estos autores en que el valor utilizado de temperatura es 170 °C, la relación licor madera es 1: 4 y porcentaje de sulfidez es 30 %. Sin embargo, los valores de carga de álcali activo utilizados están entre 13 y 24 % como Na<sub>2</sub>O y de factor H entre 615 y 2.200, estos si presentan un amplio rango de variación.

Los valores reportados por Copur & Tozluoglu 2008, indican que logran un menor grado de deslignificación que otros autores que también utilizan *Pinus brutia*, ya que obtienen un valor de número kappa y rechazo superiores (kappa 31,8 y rechazo 2,79 %) que Akgul et al. 2007 (kappa 29,6 y rechazo 1,26 %). En ambos trabajos se utilizan factores H similares; y aunque Copur & Tozluoglu 2008 trabajan con mayor álcali reportan los mismos valores de rendimientos (Akgul et al. 2007 45,2% y Copur et al. 2008 45,6 %) (Copur & Tozluoglu, 2008) (Akgul, et al., 2007).

El menor grado de deslignificación que obtiene Copur & Tozluoglu 2008 no puede explicarse con los valores de composición química de la madera de partida, ya que reportan menor valor de lignina (26,1 %) y mayor de  $\alpha$ -celulosa (47,87 %) que Akgul et al. 2007 (lignina 27,2 % y  $\alpha$ -celulosa 42,0 %) (Copur & Tozluoglu, 2008) (Akgul, et al., 2007).

El valor de viscosidad de 1.404 mL/ g que reportan Copur & Tozluoglu 2008 también indica una menor deslignificación. Este valor de viscosidad es superior al que reportan Akgul et al. 2007 de 930 mL/ g y Glusoy & Ozturk 2015 de 1.241 mL/ g (estos último utilizando *Pinus nigra*) (Copur & Tozluoglu, 2008) (Gulsoy & Ozturk, 2015) (Akgul, et al., 2007).

Glusoy & Ozturk 2015 trabajan con una carga de álcali mayor que Copur & Tozluoglu 2008 y Akgul et al. 2007, y obtienen los menores valores de número kappa, rechazo (0.5%) y rendimiento (43,5 %) por lo tanto mayor deslignificación, lo cual es esperable (Copur & Tozluoglu, 2008) (Gulsoy & Ozturk, 2015) (Akgul, et al., 2007).

En cuanto a la composición química de la madera de partida, los valores de lignina (26,35 %) y de  $\alpha$ -celulosa (47,87 %) reportados por Glusoy & Ozturk 2015 son similar a los registrados por Copur & Tozluoglu 2008. Sin embargo, el valor de hemicelulosas que reportan es inferior (Glusoy & Ozturk 2015 21,79 % y Copur & Tozluoglu 2008 28,7 % respectivamente) (Copur & Tozluoglu, 2008) (Gulsoy & Ozturk, 2015).

Glusoy & Ozturk 2015 obtienen mejores resultados del índice de resistencia a la tracción y el índice de resistencia al estallido que Copur & Tozluoglu 2008. Glusoy & Ozturk 2015 utilizan un grado de refinado correspondiente a un valor del CSF de 494 mL, reportan valores de índice de resistencia a la tracción de 95 Nm/ g y de índice de resistencia al estallido de en 5,2 kPam<sup>2</sup>/ g. Mientras que Copur & Tozluoglu 2008 (utilizando *Pinus brutia*) determina a tres grados de refinado correspondientes a CSF de 788, 638 y 290 mL valores de índice de resistencia a la tracción entre 22,5 a 63,1 Nm/ g y valores de índice de resistencia al estallido entre 0,98 a 4,79 kPam<sup>2</sup>/ g (Gulsoy & Ozturk, 2015) (Copur & Tozluoglu, 2008).

Como se mencionó en el ítem 5, el valor del número kappa es una medida del contenido de lignina. Shin et al. 2004 estudian el impacto de los extractivos residuales sobre la determinación de la lignina mediante la medida de kappa, en pulpa de tres especies de pino. Para *Pinus taeda* prueban tres condiciones de pulpeo (obteniendo valores de número kappa de 32,8, 23,8, 19,7 y concentraciones de extractivos de 2,4, 0,8 y 3,0 % respectivamente) concluyen que, en las condiciones ensayadas es mínimo el impacto de los extractivos en la determinación de la medida de lignina (Shin, et al., 2004).

### 6.3 Condiciones utilizadas para la obtención de pulpa kraft marrón

En la tabla 6 se muestran rangos de condiciones de pulpeo kraft para obtener pulpa marrón de especies de pino .

Tabla 6. Condiciones de pulpeo kraft para la obtención de pulpa marrón con madera de pino

Especie de pino	Carga álcali (%)	Sulfidez (%)	Factor H	Tempe -ratura (°C)	Relación licor-madera	Kappa	Referencia
<i>Pinus banksiana</i>	12,3	25	1.550	170	4:1	95,4	(Kubes & Fleming, 1984)
<i>Pinus taeda</i>	15,7 <sup>2</sup>	30	475	170	5:1	93,8 <sup>1</sup>	(Huang & Ragauskas, 2013)
<i>Pinus caribaea</i>	16	25	1.500	170	5:1	78	(Fuenmayor, et al., 2007)
	20		750			80	
<i>Pinus taeda</i>	11,6 <sup>2</sup>	25	2.040	170	5:1	79,6 <sup>3</sup>	(Vivian, et al., 2015)
<i>Pinus sylvestris</i>	12,4 <sup>2</sup>					77	
<i>Pinus taeda</i>	18 <sup>2</sup>	30	1.100	170	-	80 <sup>1</sup>	(Yoon & van Heiningen, 2008)
	20 <sup>2</sup>		1.300			70 <sup>1</sup>	
<i>Pinus radiata</i>	18,8 <sup>2</sup>	30	1.230	170	4:1	70	(Mansfield, et al., 2000)

<i>Pinus contorta</i>	20	25	923	170	6:1	70	(Aziz, et al., 2001)
-----------------------	----	----	-----	-----	-----	----	----------------------

<sup>1</sup>Se consideran los valores de número kappa de las muestras de control

<sup>2</sup>Carga de álcali activa expresada como Na<sub>2</sub>O

<sup>3</sup>Calculado a partir del promedio de dos valores

Como se observa en la tabla 6, los valores de número kappa reportados para pulpa kraft de pino marrón se encuentran en el rango entre 70 y 95,4 (típicamente entre 70 y 80). Existe mayormente consenso entre estos autores en que el valor utilizado de temperatura es 170 °C, mientras que los valores de relación licor: madera se encuentran entre 1:4 y 1:5 y porcentaje de sulfidez entre 25 y 30 %. Estos parámetros tienen mayor variación que en caso de pulpa kraft marrón a ser blanqueada. Los valores de álcali utilizados están entre 11,6 y 20 % como Na<sub>2</sub>O y de factor H entre 475 y 2.040 los cuales presentan un rango de variación similar al caso de pulpa kraft marrón a ser blanqueada, con valores de álcali y factor H menores.

Utilizando *Pinus taeda*, Huang & Ragauskas 2013 reportan valores de número kappa de 93,8, rendimiento de 53,2 % y rechazo de 0,9 %. El valor del rendimiento es similar al informado por Kubes & Fleming 1984 de 51,3 %, que evaluaron pulpa de *Pinus banksiana* con valor de número kappa de 95,5 (Huang & Ragauskas, 2013) (Kubes & Fleming, 1984).

Para número kappa 80, Vivian et al. 2015 informan rendimiento de 57,3 % y rechazo de 6,2 % para *Pinus taeda* y rendimiento de 54,6 % y rechazo de 6,9 % para *Pinus sylvestris*. Para igual valor de número kappa y utilizando *Pinus caribaea*, Fuenmayor et al. 2007 reportan valores de rendimientos mayores (entre 65 y 60 %) y rechazos menores (entre 2,1 y 1,9 %) (Fuenmayor, et al., 2007) (Vivian, et al., 2015).

El mayor rendimiento que reportan Fuenmayor et al. 2007 no es explicado por las diferencias en la composición química (lignina 29,56 % y holocelulosas 64,48 %) ya que presentan valores de lignina superior y holocelulosa inferior que Vivian et al. 2015, (*Pinus taeda*: lignina 26,71 % y holocelulosa 70,46 %. *Pinus sylvestris*: lignina 25,6 % y holocelulosa 67,99 %) (Fuenmayor, et al., 2007) (Vivian, et al., 2015).

Para *Pinus taeda* con valor de número kappa 80, Yoon & van Heiningen 2008 reportan rendimiento de 51 %, valor menor que el reportado por Vivian et al. 2015 evaluando la misma especie. Esto podría deberse a que Vivian et al. 2015 trabajan con cargas de álcali menores y factores H superiores, por lo que las reacciones secundarias durante la cocción no se ven favorecidas y pérdida de carbohidratos es menor (Vivian, et al., 2015) (Yoon & van Heiningen, 2008).

Yoon & van Heiningen 2008 reportan un valor de viscosidad de 1.200 mL/g para la muestra de kappa 80 y de 1.150 mL/g para la de kappa 70. Mientras que Huang & Ragauskas 2013 para la misma especie de pino,

reportan un valor de viscosidad de 1.240 mL/ g para la muestra de número kappa 94, lo cual es la tendencia esperada, ya que a mayor valor de número kappa se obtiene mayor valor de viscosidad (Yoon & van Heiningen, 2008) (Huang & Ragauskas, 2013).

Para la muestra con kappa 70, Mansfield et al. 2000 evaluaron cuatro grados de refino (revoluciones 500, 1.000, 2.000 y 4.000 correspondientes a CSF de 660, 640, 610 y 500 mL) y su relación con el índice de resistencia a la tracción (en el rango de 60, 67, 83 y 92 Nm/ g) e índice de resistencia al desgarro (en el rango de 13, 12, 10 y 9 mNm<sup>2</sup>/ g) (Mansfield, et al., 2000). Huang & Ragauskas 2013 también con cuatro grados de refino (0, 1.000, 3.000 y 5.000 correspondientes a CSF de 750, 740, 720 y 660 mL) evaluaron el Índice de resistencia a la tracción (valores de 25, 44, 55 y 65 Nm/ g) e índice de resistencia al desgarro (valores de 13, 16, 16 y 16 mNm<sup>2</sup>/ g) (Huang & Ragauskas, 2013).

Aunque Huang & Ragauskas 2013 evaluaron niveles mayores de revoluciones, al utilizar pulpa con número kappa superior el proceso de refino fue menos eficiente, por lo tanto, obtienen mayor valor de CSF. Esto también explica que el valor del índice de resistencia a la tracción es menor y el índice de resistencia al desgarro mayor que el reportado por Mansfield et al. 2000 (Huang & Ragauskas, 2013) (Mansfield, et al., 2000).

## 6.4 Viscosidad

La viscosidad es una de las variables de respuesta más relevantes en el pulpeo kraft, ya que es un indicador de la resistencia en la pulpa, Kube et al. 1981 proponen una correlación entre el valor del número kappa y la medida de viscosidad. Al analizar la variación de los distintos parámetros de cocción para *Picea mariana*, concluyen que la viscosidad es más sensible a la carga de álcali efectivo (dependencia con pendiente negativa) que a la temperatura (Kube, et al., 1981). Por lo que, a igual valor de número kappa, se prefieren aquellos ensayos que requieran menor carga de álcali.

Kubes & Fleming 1984 analizaron una temperatura máxima de cocción 170 °C, y con una carga alcalina y factor H determinados en distintas especies. Los resultados obtenidos muestran que, en las condiciones ensayadas la viscosidad queda determinada por la carga de álcali, y a una misma carga de álcali se obtienen distintos valores de número kappa, dependiendo de la especie (Kubes & Fleming, 1984).

Con el mismo objetivo Fleming & Kubes 1985 desarrollaron una ecuación que permite vincular de forma lineal la viscosidad con la concentración del ion hidroxilo durante un proceso de pulpeo, siempre que la misma sea lo suficientemente alta como para considerarse constante. En los procesos de pulpeo industrial, la concentración de ion hidroxilo varía con el tiempo, por lo que la ecuación no es aplicable. Esto condujo a la búsqueda de vincular

un parámetro medido industrialmente con la contratación de ion hidroxilo (para introducirlo a la ecuación) concluyendo que la viscosidad presenta un buen ajuste lineal con la variación del producto del Factor G y el álcali efectivo residual.

El factor G es proporcional a la integral en función del tiempo de la constante cinética de división molecular la cadena de celulosa (la constante cinética indica la rapidez con la que disminuye la viscosidad), la cual varía en función de la temperatura. Por esto el factor G resulta el vínculo entre la temperatura y el tiempo, análogo al factor H . Esto les permite predecir, con cierta seguridad, el valor de viscosidad resultante en un proceso de pulpeo kraft. Para coníferas, determinaron el valor de la pendiente ( $1,6 \times 10^{-7}$ ) y ordenada en el origen ( $7,2 \times 10^{-3}$ ) para dicho ajuste (Fleming & Kubes, 1985).

## 7 Conclusiones de la revisión bibliográfica

En Uruguay se producen 1.000.000 de m<sup>3</sup> de chips y recortes provenientes de industria de transformación mecánica de madera, además de 1.400.000 m<sup>3</sup> de madera de raleo. Dos tercios de estos subproductos de bajo valor agregado provienen de madera de pino.

Cada año existe una acumulación de madera de pino, debido a que la oferta supera la demanda. Una de las opciones por la que se optó en el año 2017 para este recurso, fue exportar rolos en pie con bajo valor agregado. Estas políticas llevan a una disminución drástica en las nuevas plantaciones, lo que a futuro podría ocasionar pérdida de diversidad de especies.

Un porcentaje de esta biomasa es actualmente usada para la generación de energía eléctrica. Esto no es sostenible en el tiempo debido al mayor aporte de otras energías renovables, como solar y eólica, en la matriz del país. El uso de chips como biomasa se verá aún más desalentado cuando la segunda planta de UPM se encuentre operativa, y se incorpore a la red eléctrica como proveedor de energía.

Buscando otras alternativas para esta materia prima, se analiza el mercado de papel y cartón. El consumo de papel se encuentra en aumento y aunque el crecimiento no es equitativo, el papel de embalaje creció de forma sostenida desde 1998, siendo la segunda categoría que presentó mayor aumento. Para la producción de éste se utiliza un alto porcentaje de pulpa

marrón lo cual lo convierte en un producto atractivo económicamente para ser producido con una materia prima de bajo costo, como son los chips y recortes de aserraderos y la madera de raleo.

Al analizar la producción de pulpa de celulosa en industrias no integradas a nivel mundial, se descartan los procesos de pulpeo termo-mecánicos y semi-químicos, a pesar de que en su mayoría utilizan madera de conífera, el volumen de producción es pequeño y la producción está concentrada en pocos países.

Las industrias de pulpa mecánica y al sulfito presentan mayor escala de producción que los procesos anteriores, pero los datos no permiten distinguir claramente que madera se prefiere para estos métodos.

La pulpa de celulosa obtenida por el método kraft representa el 91 % de la pulpa química producida y el 75 % del total de la pulpa producida en el mundo. Esto se debe a que presenta grandes ventajas: el ciclo de recuperación de químicos le permite funcionar con baja reposición y elevada escala de producción, además de disminuir sensiblemente el impacto ambiental. El sulfuro de sodio genera fibras de mejor calidad, por lo cual el proceso kraft presenta un rendimiento superior al de otros métodos de pulpeo químico. Además, cuenta con un sistema de cogeneración que le proporciona autosuficiencia energética y excedente de energía para vender.

En la región la mayor parte de la pulpa kraft no blanqueada proviene de madera de coníferas (83 % en Brasil y el total de Chile). En Uruguay ya existen industrias instaladas que utilizan este método de pulpeo, aunque es aplicado para la obtención de pulpa blanqueada de eucalipto. Esto fundamenta el interés de la evaluación de este tipo de procesos en la obtención de pulpa no blanqueada de pino (conífera).

Cuando se produce pulpa de celulosa de pino para blanquear los resultados reportados en la literatura indican que el valor de kappa debe estar en un rango de 25 a 35 de manera de alcanzar condiciones favorables para lograr un determinado grado de blancura. En cuanto a las condiciones de pulpeo, la relación licor madera se ha determinado en la mayoría de los trabajos analizados un valor de 4:1, la temperatura máxima en 170 °C y el porcentaje de sulfidez de 30 %.

La mayor variación se encuentra en el factor H, que depende de la especie de pino utilizada y puede ir desde 800 hasta 1.800, mientras que la carga de álcali suele estar en el entorno de 18 a 20 % como Na<sub>2</sub>O. Para dichas condiciones, los valores de rendimiento se encuentran en un rango de 40 a 50 %, mientras que los valores de rechazo oscilan entre 0,5 y 4,5 %.

En general, estas pulpas son blanqueadas luego de medir rendimiento y rechazo, por lo que hay pocos valores de viscosidad y propiedades mecánicas reportadas para la pulpa marrón producida.

Para la pulpa destinada a la producción de papel de embalaje, en promedio se busca el valor de kappa de 80, aunque hay reportes donde el valor objetivo es de 70 o 90. Al igual que la pulpa para blanquear, existe consenso entre los autores al determinar que la temperatura máxima es de 170 °C y que la relación licor madera es de 4:1 o 5:1. Los porcentajes de sulfidez reportados varía entre 25 y 30 %, aunque en la mayoría de los trabajos que utilizan *Pinus taeda* fijan el porcentaje de sulfidez en 30 %.

Las pulpas con kappa 80 se obtienen con valores de carga de álcali entre 15 y 20 % como Na<sub>2</sub>O, y valores de factor H entre 750 y 2.040, descendiendo conforme aumenta la carga, salvo excepciones.

Las pulpas con kappa 70, fueron pulpeadas con cargas mayores, entre 18,8 y 20 % como Na<sub>2</sub>O con factores H entre 923 y 1.300, siendo el *Pinus taeda* el que necesitó condiciones de pulpeo más agresivas. Por otro lado, las pulpas con kappa mayores a 90 fueron las que presentaron cargas más bajas, entre 12,3 y 15,7 % como Na<sub>2</sub>O con factores H de 1.167 y 1.550, lo cual es de esperar.

Las muestras con kappa entre 70 y 90 presentan rendimientos entre 50 y 65 %, y los valores de rechazo se encuentran en el rango de 0,9 a 6,9 %. Ambos parámetros son más elevados que los obtenidos con pulpa a kappa menor, dado por la menor deslignificación del material. Para estas pulpas, con *Pinus taeda* se reportan valores de viscosidades entre 1.150 y 1.240 mL/ g, similares a los obtenidos por Glusoy et al. 2015.

Entre las propiedades papeleras más relevantes para el papel de embalaje se encuentran la resistencia a la tracción, que con un solo ensayo experimental permite determinar al mismo tiempo el estiramiento, la rigidez de tracción y la absorción de energía de tracción. La resistencia al estallido es una propiedad particularmente importante para este tipo de papeles, así como la resistencia al desgarro, que es una medida de la longitud y unión entre las fibras. La resistencia al plegado podría adquirir relevancia dependiendo de la aplicación del papel de embalaje.

## PARTE EXPERIMENTAL

### 8 Objetivo de la parte experimental

#### 8.1 Objetivo general

Producir pulpa marrón Kraft con los requisitos de mercado para papeles de embalaje a partir de la madera residual de pino disponible en el país

#### 8.2 Objetivos específicos

Utilizar chips subproductos de aserraderos para obtener experimentalmente (cocción, refinado y tamizado) pulpa marrón, al variar la carga de álcali y el factor H en la cocción.

Ensayar las mejores condiciones de cocción de los chips de aserradero en madera de raleo y de turno final.

Medir en la pulpa los siguientes parámetros de respuesta: número kappa, rendimiento, rechazo y viscosidad; pH en el licor negro, y álcali residual.

Determinar las propiedades papeleras a las pulpas obtenidas con las mejores condiciones de cocción (combinación de carga de álcali y factor H).

Determinar propiedades papeleras en muestras de pulpas comerciales, para comparar con las muestras obtenidas en el laboratorio.

## 9 Materiales y métodos

### 9.1 Materia prima

Las cocciones fueron realizadas con chips de pino generados como subproductos del proceso de aserrado. Estos chips son proporcionados por el aserradero DANK S.A. y provienen de trozas basales de tala rasa, de árboles plantados en el año 1995 (24 años) con un diámetro promedio en la punta fina de 40 cm (información aportada por la empresa). Con esta madera se ajustan los diferentes parámetros de pulpeo y se miden las propiedades para determinar las características pulpables de la madera de pino. En la Figura 15 se observa una muestra los chips subproductos de aserradero, previo al proceso de clasificación.



*Figura 15. Muestra de chips subproducto del proceso de aserrado*

A los efectos de evaluar si las condiciones determinadas para los chips provenientes de aserradero son aplicables a otras maderas de pino factiblemente disponibles, se realizan ensayos sobre otros ejemplares de *Pinus Taeda*. Por un lado, se utiliza madera de turno final (tala rasa, predio “Corona”, Tacuarembó) plantada en 1999 y que se taló en octubre de 2019 (20 años), utilizando tres ejemplares de 54,3, 40,0 y 38,6 cm de diámetro apical. Por otro lado, se utiliza madera de raleo comercial (Los Moros, Rivera) plantada en 2003 y talada en octubre de 2019 (16 años) utilizando también tres ejemplares de 28,2, 30,9 y 22, cm de diámetro apical. Para la madera de turno final y la de raleo, se realiza una muestra compuesta de los tres ejemplares posterior al proceso de chipeado, donde cada muestra incluye una troza y dos ramas por árbol (ambos sin corteza). En la Figura 16 se muestran trozas y ramas de la turno final y raleo.



Figura 16. Trozas y ramas provenientes de árboles de turno final y raleo

Las muestras de pulpa comercial son proporcionadas por ARAUCO (Chile). Son muestras de pulpa kraft no blanqueada de softwood (en particular de conífera, *Pinus radiata*) (Unbleached softwood kraft pulp - UKP), con nombre comercial “Low Kappa” y “Light Colour” (Figura 17).

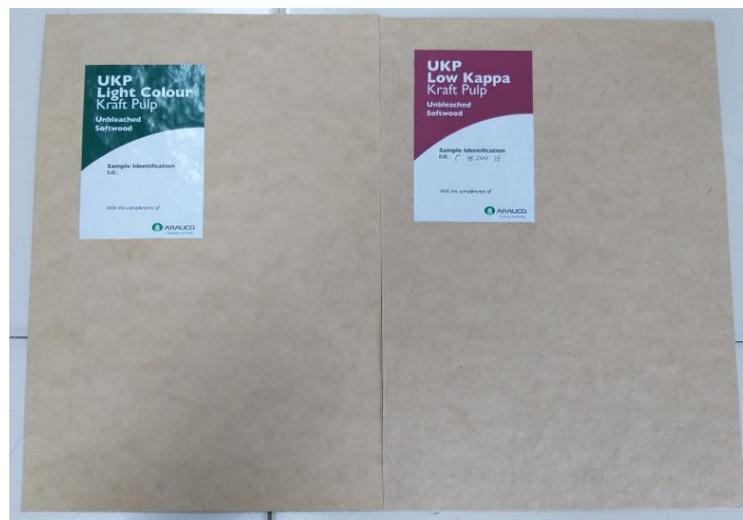


Figura 17. Muestras de pulpa comercial “Low Kappa” y “Light Colour”

## 9.2 Chipeado, secado y clasificación

Las trozas provenientes de árboles de turno final y raleo se chiapan en un equipo, que cuenta con un sistema de clasificación interno. Esto le permite volver a chiapan la fracción que presenta mayor tamaño que el aceptado y descartar la fracción que presenta menor tamaño que el aceptado.

Los chips (subproductos de aserradero, turno final y raleo) presentan una humedad inicial en el entorno del 50 % (bh), por lo que deben ser secados para evitar el crecimiento microbiológico y poder consérvalos sin alteraciones.

El secador marca Nardi se compone de un sistema de bandejas (con fondos perforados y separados entre ellos), con circulación de aire mediante hélices, el control de temperatura se regula de forma automática mediante el encendido de resistencia y el grado de apertura de las compuertas que comunican las hélices con el secador (Figura 18). Los chips son secados a 40 °C durante 72 horas, hasta una humedad final en el entorno del 8 % (bh). Cada 24 horas fue mezclado el contenido de las bandejas para mejorar la uniformidad durante el secado.



*Figura 18. Secador de bandejas con chips.*

Antes del proceso de cocción los chips son clasificados. Para los chips producidos como subproductos de aserradero se utiliza un tamiz (Regmed

Indústria Técnica de Precisão Ltda., fabricado en Brasil modelo CC-2), con diferentes bandejas de acuerdo con la norma SCAN-CM 40:01 (SCAN-CM 40:01, 2001). Fueron descartados los chips comprendidos en la fracción de finos (no son retenidos por una malla con orificio de 7mm) y la fracción de gruesos (son retenidos una malla con ranuras de 8mm), aceptando las dos fracciones intermedias (Figura 19).



*Figura 19. Tamiz de clasificación de chips con medidas de las bandejas utilizadas*

Para los chips de residuos de aserradero, turno final y raleo, previo a cada ensayo se realiza una selección manual de las fracciones aceptadas para verificar que el chip se encuentre en condiciones y no presente corteza u otras irregularidades.

### 9.3 Determinación de densidad básica

Se colocan aproximadamente 200 g de chips secos (masa de sólido seco) en una bolsa de tela la cual es sumergida en agua destilada durante 72 horas con un peso encima para evitar que floten. Pasadas las 72 horas la bolsa de tela con los chips se centrifuga durante 30 segundos. El volumen de madera se determina a través del volumen de agua destilada desplazada por los chips saturados en agua; previo a realizar la medida se descartan aquellos chips que flotan. Los chips que no flotan son secados en estufa a 105 °C para determinar la masa de sólido seco. La técnica se realiza según la norma TAPPI T 258 OM-16 (TAPPI Test Method T 258 om-02, 2006) y la medida se realiza por triplicado.

### 9.4 Caracterización fisicoquímica de los chips

Para caracterizar la madera de pino, primero se cuantifican extractivos, esto se realiza por duplicado en agua y en etanol (Sluiter, et al., 2008) y posteriormente se mezclan los duplicados para generar una muestra compuesta. La biomasa libre de extractivos se hidroliza para cuantificar carbohidratos y lignina (Sluiter, et al., 2012) lo cual se realiza por triplicado. La determinación de azúcares y ácidos se realiza en un HPLC (cromatografía líquida de alta eficacia - *high performance liquid*

*chromatography*) (Shimadzu corporation. Kioto, Japón) (Sluiter, et al., 2012). La columna utilizada es Aminex HDX-87H, el flujo 0,6 ml/ min, la temperatura 45 °C, el tiempo de retención 65 minutos y la fase móvil es ácido sulfúrico 0,005 M. Se cuantifican cenizas de acuerdo con TAPPI T 211 om-02 (TAPPI Test Method T 211 om-02, 2007), por duplicado.

## 9.5 Selección de las condiciones de cocción

En base a las conclusiones de la revisión de literatura, se seleccionan los parámetros operativos considerados fijos y los variables a evaluar en cada ensayos. Los parámetros que se mantienen constantes para todas las cocciones son la temperatura máxima de cocción, la relación licor madera y el porcentaje de sulfidez, en función de los reportes de literatura que utilizaron *Pinus taeda*. Los niveles seleccionados son aquellos que se reportan en los artículos analizados en el ítem 6.4 y en particular, los utilizados para producir pulpa con valor de kappa en el entorno de 80:

- Temperatura Máxima: 170 °C
- Sulfidez: 30 %
- Relación licor madera: 4,5:1

Los parámetros que varían en las distintas cocciones son la carga de álcali y el factor H, debido a que las variables de respuesta son más sensibles a

cambios en estos parámetros, y que los valores reportados de dichos parámetros son muy diversos.

Se utilizan cuatro valores de factor H, siendo el valor inicial 720 que se encuentra en el orden de los menores reportados en el ítem 6.4. Se aumenta sucesivamente en intervalos de 180, resultando en los valores de factor H 900, 1.080 y 1.260 (correspondientes a 1,25 1,50 y 1,75 del valor inicial).

La carga de álcali activo inicial es de 19,5 % ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), que está en el orden de las cargas más altas reportadas en el ítem 6.4 mientras que la menor carga de álcali utilizada es de 14 % ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), un punto por debajo de la menor carga reportada en la tabla 6 (para pulpa de kappa 80).

Comenzando por el valor de factor H 720, se realiza el ensayo con una carga de álcali alta (19,5 % como  $\text{Na}_2\text{O}$ ), y al obtener pulpa con valor de kappa menor que el valor objetivo (kappa 80) se disminuye la carga de álcali en el siguiente ensayo. Manteniendo el factor H, la carga se disminuye en los sucesivos ensayos hasta obtener pulpa con valor de kappa cercano al objetivo. Este procedimiento se repite sucesivamente con los distintos factores H (factor H creciente), tomando como carga de álcali inicial un valor cercano a la carga de álcali del factor H anterior que permite obtener la pulpa objetivo.

## 9.6 Operativa en la cocción

La cocción se lleva adelante en un baño de aceite (Fibretec modelo FBI PT 2002B, India) con espacio para 8 reactores (cápsulas) (Figura 20). Cada condición se realiza por cuadruplicado (4 cápsulas por condición). En cada cápsula se colocan  $(56 \pm 1)$  g de chips secos y 240 mL de licor, lo que da como resultado una relación licor madera promedio de 1 a 4,5.



*Figura 20. Digestor con y sin cápsulas de cocción*

El licor blanco es preparado a partir de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), para los cuales se consideran valores de pureza de 98 % y 66 % respectivamente.

Para cada condición, la masa de NaOH y  $\text{Na}_2\text{S}$  que componen el licor blanco se determina a partir de la carga de álcali (ecuación 4) y el porcentaje de sulfidez (ecuación 3) de esa condición, considerando la masa

seca de chips (54 g por cápsula y 4 cápsulas por condición). La masa de reactivos correspondiente es disuelta en 400 mL de agua destilada.

Para la elaboración del licor blanco, primero se disuelve el  $\text{Na}_2\text{S}$  en el agua destilada, mediante un sistema de agitación con pastilla magnética y luego se incorpora el  $\text{NaOH}$  gradualmente, ya que produce una reacción exotérmica. El proceso es realizado en campana.

Al licor blanco preparado en cada condición se le determina la medida de álcali (ISO Standard No. /AWI 23774, 2016), con lo cual se ajusta el volumen de agregado de licor a cada cápsula para lograr la carga de álcali objetivo. Para respetar la relación licor – madera, se adiciona el volumen de agua destilada correspondiente a cada cápsula (240 mL). El volumen de licor se justifica en función de la masa seca de chips.

Posterior al cargado de las cápsulas con chips y licor, estas son cerradas y sujetadas al eje del baño de aceite, para ser sumergidas. Primero se realiza la impregnación, para la cual las cápsulas se mantienen a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  durante una hora con agitación (inducida por la rotación del eje). En el proceso de impregnación se elimina el aire ocluido en los chips, lo que permite que el licor entre en la matriz. Luego se realiza el calentamiento hasta los  $170\text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura de cocción) y se mantiene esa temperatura hasta completar el factor H objetivo en cada ensayo. Durante el calentamiento se registran datos de temperatura cada 5 minutos y a temperatura máxima se registran datos de temperatura cada 2 minutos, esto permite calcular el factor H

durante en ensayo a partir de la ecuación 6. No se registran datos de temperatura durante la impregnación ya que el factor H está definido para temperaturas mayores a 100 °C, por lo que el aporte de esta etapa sería nulo.

Al finalizar la cocción, las cápsulas son sumergidas en un recipiente con agua a temperatura ambiente por 30 minutos para disminuir rápidamente la temperatura, deteniendo las reacciones.

Posteriormente se abren las cápsulas y el contenido se traspasa a una bolsa de tela (cada cápsula cuenta con una bolsa de tela asignada), en la cual se separa el licor negro por centrifugado el cual es refrigerado rápidamente para evitar la pérdida de álcali residual.

El contenido de las bolsas es lavado a mano con agua desionizada, en 3 ciclos de centrifugado con 2 litros de agua en cada uno, luego de la última centrifugación las bolsas se colocan en un recipiente con agua desionizada y un elemento pesado para mantenerlas sumergidas donde se drenan durante 24 horas (Figura 21). Para finalizar el lavado son centrifugadas, lavadas a mano con dos litros de agua desionizada y centrifugadas por última vez.



*Figura 21. Bolsas de tela con pulpa luego de drenarse durante 24hs.*

## 9.7 Operativa del proceso de refinado

Debido a que las condiciones de cocción son leves, las muestras no llegan al punto de desfibrilación y se tiene un elevado valor de rechazo. Por lo que, posterior a la cocción, se realiza un refinado mecánico en un refinador de discos (compañía Kumagai Riki Kogyo Co., Ltd., Tokio, Japón) (Figura 22).



*Figura 22. Discos del refinador.*

El número de veces que la muestra debe ser pasada por el refinador se determinada mediante observación al microscopio de los haces de fibra, hasta obtener fibras libres (Figura 23).



*Figura 23. Observación al microscopio de una muestra de pulpa, posterior al proceso de refinado.*

Los discos del refinador son de 30 cm y la distancia entre los discos se ajusta a 1,12 mm. La suspensión de pulpa se pasó dos veces por el

refinador. El refinador no permite medir rendimiento bruto (rendimiento posterior a la refinación) ya que existen fugas detrás del disco fijo, lo que implica pérdida de masa.

## 9.8 Desagregado de la pulpa comercial

Las hojas de pulpa comercial se desagregan manualmente en trozos de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>, los cuales son sumergidos en agua destilada durante 24 horas. Se utiliza una relación de 5 L de agua destilada cada 120 g de pulpa seca cada. Luego de las 24 horas, los trozos de pulpa hidratados son separados en cuatro fracciones, y cada fracción se homogeneiza en un desintegrador de pulpa (Universal Engineering Corporation, modelo UEC-2008, India) 2 L de agua destilada a 40 °C durante 15 minutos.

## 9.9 Medidas realizadas en la pulpa y en el licor negro

Al licor negro se le midió el pH mediante electrodo de pH y álcali residual (ISO Standard No. AWI 23772, 2016).

El rendimiento bruto de cocción se determina individualmente en cada cápsula (luego de la cocción y previo al refinado). Este se define como el cociente de la la masa seca de pulpa al final de la cocción y la masa seca

de chips colocados en cada cápsula y. Luego el contenido de las 4 cápsulas fue mezclado produciendo una única muestra por condición.

A la pulpa luego del refinado se le determinó el rechazo (material fibroso que no se transformó en pulpa), para lo cual primero se pasó por un homogeneizador (Kumagai Riki Kogyo Co., Ltd. Tokio, Japón) y luego se pasó por un tamiz separador (Kumagai Riki Kogyo Co., Ltd., Tokio, Japón)(Figura 24).



*Figura 24. Homogeneizador y tamiz de pulpa.*

La pulpa se coloca con agua (a una presión de  $8 \text{ kg/cm}^2$ ) sobre el tamiz el cual tiene una placa con ranuras de  $0,15 \text{ mm}$  durante 20 minutos. La fracción de pulpa que pasa es la aceptada mientras que la fracción retenida es la rechazada. Para esto se midió la masa de pulpa aceptada y se le determinó el contenido de humedad , por otro lado, se seca el rechazo en

una estufa a 105 °C. Finalmente se calculó que porcentaje representa el rechazo, de la suma de pulpa y rechazo seco.

En el laboratorio se midió el valor de número kappa (ISO Standard No. 302, 2015) por duplicado, como forma indirecta de conocer la lignina remanente en la pulpa.

La medida de viscosidad se realizó según la norma ISO 5351 (ISO Standard No. 5351, 2010). Para esto, la pulpa se disolvió en una solución de cuprietilendiamina a la que se le determinó el tiempo que demora en efluir un determinado volumen por un tubo capilar. Para cada muestra se realizó una disolución y tres determinaciones de tiempo (con diferencia entre tiempos menor a 2 segundos). Esta norma es válida para pulpas con bajo contenido de lignina (menor al 5 %), ya que cuando no es así la disolución en cuprietilendiamina no es completa, por lo cual la bibliografía propone realizar la disolución y luego filtrar el material antes de medir el tiempo que demora en fluir (Ucar & Balaban, 2004) (Sixta, et al., 2006). El valor obtenido no está estandarizado, pero puede ser utilizado como parámetro interno para evaluar las pulpas y como insumo para toma de decisiones.

## 9.10 Propiedades físicas

Las propiedades papeleras se midieron a 3 grados de refino en el molino PFI a 6.000, 9.000 y 12.000 revoluciones, los cuales se determinaron a

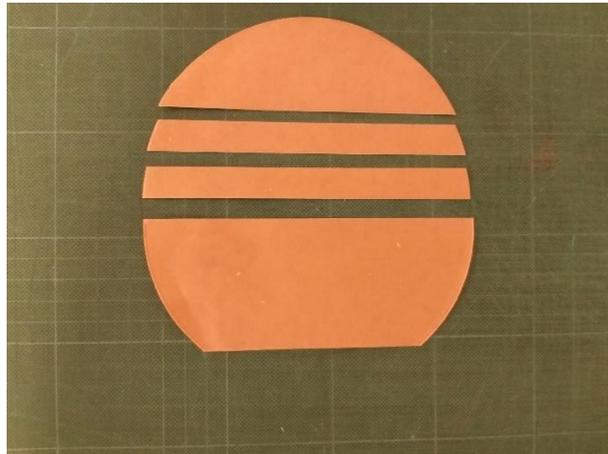
partir de ensayos preliminares A un número de revoluciones mayor a 18.000 el daño que se genera en la fibra, junto con el aumento de temperatura producen que la muestra se deteriore y comience a quemarse. Y a un número de revoluciones menor a 6.000 los enlaces que se generan en las fibras no son suficientes para que se produzca la formación de la hoja.

A cada grado de refino se determinó el valor de CSF (Canadian Standard Freeness de acuerdo con la norma TAPPI T 227) (TAPPI Test Method T 227 om-17, 2007) y se formaron diez hojas por muestra (ISO Standard No. 5264-2, 2011) (ISO Standard No. 5269-2, 2004) que fueron acondicionadas en una cámara a 23 °C y humedad relativa de 50 % durante al menos 16 horas previo a las medidas (ISO Standard No. 187, 1990). Para caracterizar las hojas se determinó: gramaje (ISO Standard No. 536, 2019), espesor (ISO Standard No. 534, 2011), opacidad (ISO Standard No. 2471, 2008) y permeabilidad al aire (ISO Standard No. 5636-5, 2013), diez réplicas por muestra.

Las propiedades papeleras que se ensayaron fueron: resistencia a la tracción (TAPPI Test Method T 494 om-01, 2006), resistencia al desgarró (ISO Standard No. 1974, 2012) y resistencia al estallido (ISO Standard No. 2758, 2014). De la resistencia al desgarró y la resistencia al estallido se ensayaron diez medidas por muestra (una por hoja) y de la resistencia a la tracción se ensayaron veinte medidas por muestra (dos por hoja).

El número de réplicas de las resistencias queda determinado por el corte de cada hoja para formar las probetas de ensayo (Figura 25). En la sección superior se determinó la resistencia al estallido, en la sección inferior se determinó la resistencia al desgarro y en las dos secciones intermedias se determinó la resistencia a la tracción.

Con el gramaje se calculan los índices de las propiedades mecánicas (índice de resistencia al estallido, índice de resistencia al desgarro e índice de resistencia a la tracción), siendo estos el cociente entre el valor medido de la resistencia (resistencia al estallido, resistencia al desgarro y resistencia a la tracción) y el gramaje. Dicha normalización permite comparar distintas muestras.



*Figura 25. Una hoja cortada en probetas para determinar propiedades papeleras.*

A las dos pulpas se le analizaron las mismas propiedades papeleras que a las muestras producidas en el laboratorio a tres grados de refino: 6.000, 9.000 y 12.000 revoluciones por minuto.

### 9.11 Análisis estadístico para propiedades papeleras

El error de las medidas de las propiedades papeleras se calcula con la desviación estándar y se informa con el intervalo  $\pm$  de dicho valor. El análisis estadístico se realiza mediante el ANOVA y posterior separación de medias mediante el test con método Tukey (valor de confianza 95 %) utilizando el programa Infostat. En las tablas se presentan los resultados utilizando cada muestra como un subconjunto (para cada condición, se comparan los valores a las distintas revoluciones por minuto). El mismo tratamiento se realiza seleccionando las revoluciones por minuto como subconjunto (para un mismo valor de revoluciones por minuto se comparan las condiciones).

## 10 Resultados y discusión

### 10.1 Materia prima utilizada

En este ítem se presentan los resultados y la discusión del trabajo experimental. En los ítems de 10.1 a 10.4 el error en las medidas se calculó como el doble de desviación estándar y se informa con el intervalo  $\pm$  de dicho valor. El error en el cálculo del factor H corresponde al aporte en  $\pm 1$  minuto a temperatura máxima. El error en la carga de álcali y en el álcali residual corresponde a  $\pm 0,1$  mL en la titulación.

En la Figura 26, se muestra la distribución de tamaño de chips de aserraderos obtenida luego de la clasificación. Se observa que las fracciones no aceptadas son significativamente menores que la fracción aceptada, por lo que la distribución de tamaño no es un impedimento para usar este subproducto en la producción de pulpa. Además, la fracción rechazada por sobredimensión puede eventualmente rechipearse en planta o quemarse como biomasa.

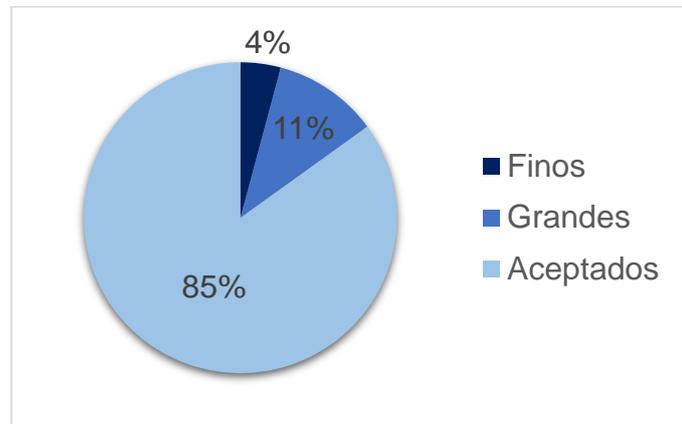


Figura 26. Clasificación de chips de aserradero por tamaño

La densidad básica de los chips de aserradero es de  $466 \pm 2 \text{ kg/ m}^3$ , mientras que para la madera de turno final es de  $442 \pm 10 \text{ kg/ m}^3$  y para la madera de raleo es de  $432 \pm 6 \text{ kg/ m}^3$ . El valor de densidad básica para los chips de aserradero es un poco mayor a otro reportado para la misma especie de pino ( $435 \text{ kg/ m}^3$ ) (Vivian, et al., 2015).

La diferencia en las densidades básicas podría deberse a que las muestras de raleo y de turno final, estaban compuestas por trozas y ramas. Las ramas tienen mayor contenido de madera de reacción, rica en lignina, el mayor contenido de lignina puede verse en la caracterización del material (tabla 7). Al ser la lignina un componente hidrofóbico, cuando mayor es el contenido de lignina, menor es el volumen saturado en agua obtenido para una misma muestra de sólido seco. Esto podría explicar porque aquellas muestras con ramas presentaron menores valores de densidad básica.

La densidad de los chips adquiere relevancia al momento de dimensionar los equipos que componen la una planta de pulpa kraft, particularmente el

reactor donde se realiza la cocción. Ya que para un mismo flujo masa (considerando la masa de sólido seco), el volumen requerido es mayor cuando mayor sea la densidad de los chips.

En la tabla 7, se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de los tres tipos de madera de *Pinus taeda*, en término de sus componentes estructurales. Los valores corresponden a porcentaje en masa seca con extractivos. XMG corresponde a los contenidos de xilosa, manosa y galactosa expresados como xilosa.

Tabla 7. Caracterización química de distintas maderas de pino.

	<b>Chips Aserradero (g/ 100g de madera)</b>
Cenizas	0,37
Extracción en agua	1,56 ± 0,38
Extracción en etanol	1,90 ± 0,08
Lignina insoluble	27,9 ± 1,4
Lignina soluble	3,1 ± 0,6
Glucosa	47,2 ± 4,2
Arabinosa	2,8 ± 1,5
XMG	9,4 ± 0,5

	<b>Raleo (g/ 100g de madera)</b>
Cenizas	0,35
Extracción en agua	2,16 ± 0,10
Extracción en etanol	3,39 ± 0,04
Lignina insoluble	29,7 ± 2,6
Lignina soluble	4,1 ± 1,2
Glucosa	45,4 ± 1,0
Arabinosa	2,9 ± 0,6
XMG	9,8 ± 0,3

	<b>Turno final (g/ 100g de madera)</b>
Cenizas	0,33
Extracción en agua	3,08 ± 0,32
Extracción en etanol	2,27 ± 0,08
Lignina insoluble	28,8 ± 0,8
Lignina soluble	4,8 ± 2,4
Glucosa	47,2 ± 3,6
Arabinosa	2,3 ± 0,3
XMG	9,5 ± 0,3

Los tres tipos de madera (chips subproductos de aserradero, raleo y turno final) presentan contenidos similares de glucosa, arabinosa y XMG. Además, la madera de raleo y turno final presentan contenidos similares de lignina total (lignina soluble e insoluble) y extractivos totales (extractivos en agua y en etanol).

Los chips subproductos de aserradero, presentan menor contenido de extractivos totales y lignina total, por lo que son una materia prima más favorable para el pulpeo químico, debido a que se genera menor consumo de químicos.

## 10.2 Cocción para chips subproducto de aserradero

En la tabla 8, se presentan los ensayos de pulpeo, con las condiciones de carga de álcali y factor H utilizados, además de los valores de álcali residual y pH en el licor negro para cada ensayo.

Tabla 8. Valores de pH y álcali residual en el licor negro

<b>N° de ensayo</b>	<b>Factor H (± 17)</b>	<b>Carga de álcali (%Na<sub>2</sub>O) (± 0,5)</b>	<b>pH licor negro</b>	<b>Álcali residual (gNa<sub>2</sub>O) (± 0,07)</b>
1	733	13,4	12,27	1,09
2	721	17,1	12,41	2,00
3	733	19,5	13,05	3,36
4	973	16,5	13,17	1,73
5	909	18,7	13,08	1,36
6	1.092	12,9	11,46	0,73
7	1.077	16,0	12,00	0,91
8	1.082	17,1	13,29	1,18
9	1.084	19,1	11,89	2,00
10	1.268	14,0	13,02	0,24
11	1.266	14,5	11,93	0,91
12	1.260	15,0	12,49	0,40
13	1.265	16,1	11,01	1,64
14	1.258	16,8	12,10	1,73

En todos los casos de la tabla 8, el pH final en el licor negro siempre se encuentra en un valor superior a 11, por lo que no existe riesgo de precipitación de lignina. Para un mismo valor de factor H, cuando se

aumenta la carga de álcali, la tendencia es aumentar el valor de álcali residual, aunque los ensayos 4, 5, 11 y 12 no siguen el patrón.

Se prefieren aquellas condiciones de cocción en donde el valor del álcali residual es el recomendado, porque la menor carga de álcali permite obtener pulpas con valores de viscosidad mayores, lo que implica un mayor grado de polimerización. Las fibras con mayor grado de polimerización son fibras mejor preservadas durante el pulpeo (de mayor longitud), por lo que se obtienen valores de propiedades físicas más elevados, por ende, pulpa de mayor calidad (Sixta, et al., 2006).

El valor recomendado de álcali residual es de 2 a 4 g/ L como  $\text{Na}_2\text{O}$ , como en cada ensayo se utilizan 0,24 L, el valor de álcali residual recomendado para cada ensayo es de 0,48 a 0,96 g como  $\text{Na}_2\text{O}$ .

El valor de álcali residual es menor al máximo recomendado en los ensayos número 6, 7, 10, 11, 12 como se observa en la tabla 8. Los ensayos número 10 y 12 son los únicos que presentaron un valor de álcali residual menor al mínimo recomendado, lo que implicaría que la carga de álcali utilizada en el factor H de esas condiciones (factor H 1.260) podría ser demasiado baja.

En la tabla 9, se presentan los resultados de rendimiento bruto de cocción y número kappa, para los ensayos realizados.

Tabla 9. Valores de rendimiento bruto y número kappa

<b>N° de ensayo</b>	<b>Factor H (<math>\pm 17</math>)</b>	<b>Carga de álcali (%Na<sub>2</sub>O) (<math>\pm 0,5</math>)</b>	<b>Rendimiento bruto (%)</b>	<b>Número Kappa</b>
1	733	13,4	67,1 $\pm$ 2,0	117,5 $\pm$ 5,8
2	721	17,1	54,6 $\pm$ 1,4	112,9 $\pm$ 8,0
3	733	19,5	48,1 $\pm$ 1,6	62,5 $\pm$ 3,8
4	973	16,5	53,0 $\pm$ 1,8	101,6 $\pm$ 0,8
5	909	18,7	53,3 $\pm$ 2,0	82,0 $\pm$ 3,0
6	1.092	12,9	58,1 $\pm$ 1,6	115,2 $\pm$ 0,8
7	1.077	16,0	60,7 $\pm$ 1,2	85,1 $\pm$ 5,8
8	1.082	17,1	56,0 $\pm$ 3,4	76,6 $\pm$ 0,6
9	1.084	19,1	46,2 $\pm$ 1,2	61,2 $\pm$ 0,2
10	1.268	14,0	52,5 $\pm$ 1,4	83,7 $\pm$ 1,2
11	1.266	14,5	51,1 $\pm$ 4,2	78,0 $\pm$ 1,4
12	1.260	15,0	52,9 $\pm$ 1,4	67,8 $\pm$ 1,0
13	1.265	16,1	41,4 $\pm$ 1,4	52,6 $\pm$ 2,4
14	1.258	16,8	44,7 $\pm$ 1,8	45,5 $\pm$ 2,4

Los rendimientos para ensayos con valores de kappa superiores a 68 coinciden con los reportados en bibliografía (Huang & Ragauskas, 2013) (Fuenmayor, et al., 2007) (Vivian, et al., 2015) (Aziz, et al., 2001), estando en un rango entre 50 y 65 %

Aquellos ensayos con valores de kappa menores a 68, presentan rendimientos inferiores entre 40 y 50 %, lo cual también coincide con lo reportado en bibliografía y con lo esperado dadas las características del proceso (Hortling, et al., 2001) (Gabriel-Parra, et al., 2018) (Akgul, et al., 2007) (Copur & Tozluoglu, 2008) (Gulsoy & Ozturk, 2015).

La diferencia en los valores de rendimiento entre pulpas con valores de número kappa altos (definidos como mayores que 68) y bajos (menores que 68), es debida a que al aumentar el grado de deslignificación se obtienen pulpas con menor contenido de lignina residual (lignina en la pulpa) y se produce mayor pérdida de carbohidratos por reacciones secundarias debido a que , ambos fenómenos implican menor masa. Por lo tanto, para la misma masa inicial de chips, un menor valor de número kappa indica menor masa de pulpa al finalizar la cocción, en consecuencia, menor rendimiento.

En la Figura 27 se observa que el aumentar el valor de número kappa aumenta el rendimiento, lo cual es la tendencia esperada.

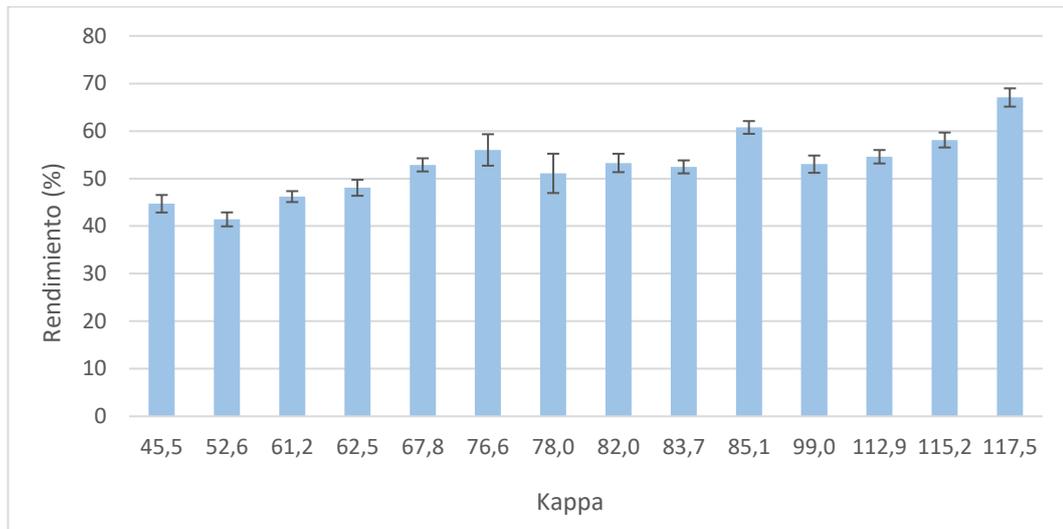


Figura 27. Valores de rendimiento bruto en función del número kappa.

El ensayo número 7 (kappa 85,1) se aleja de la correlación mencionada, ya que presenta un valor de rendimiento mayor que los otros ensayos con valor de número kappa similar. Sin embargo, si se mira la variación del rendimiento dentro de cada conjunto de factores H, al aumentar la carga disminuye el rendimiento, como es esperado (considerando el margen de error). Igualmente, los rendimientos de los 3 ensayos con valor de número kappa cercanos a 80 (ensayos 5, 7 y 10), se encuentran dentro del rango esperado por bibliografía.

En la tabla 10, se ven los valores de rechazo (posterior a la etapa de refinación) de las condiciones ensayadas.

Tabla 10. Valores de rechazo y número kappa

<b>N° de ensayo</b>	<b>Factor H (<math>\pm 17</math>)</b>	<b>Carga de álcali (%Na<sub>2</sub>O) (<math>\pm 0,5</math>)</b>	<b>Rechazo (%)</b>	<b>Número Kappa</b>
1	733	13,4	5,3	117,5 $\pm$ 5,8
2	721	17,1	5,3	112,9 $\pm$ 8,0
3	733	19,5	2,5	62,5 $\pm$ 3,8
4	973	16,5	1,3	101,6 $\pm$ 0,8
5	909	18,7	3,0	82,0 $\pm$ 3,0
6	1.092	12,9	3,7	115,2 $\pm$ 0,8
7	1.077	16,0	1,1	85,1 $\pm$ 5,8
8	1.082	17,1	4,6	76,6 $\pm$ 0,6
9	1.084	19,1	0,7	61,2 $\pm$ 0,2
10	1.268	14,0	0,3	83,7 $\pm$ 1,2
11	1.266	14,5	1,2	78,0 $\pm$ 1,4
12	1.260	15,0	0,5	67,8 $\pm$ 1,0
13	1.265	16,1	0,1	52,6 $\pm$ 2,4
14	1.258	16,8	0,4	45,5 $\pm$ 2,4

Los valores de rechazo para pulpas con un valor del número kappa entre 70 y 90 se encuentran dentro del rango esperado (rango esperado de 0,9 a 6,9 %), sin embargo, el ensayo 10 se aleja de la tendencia presentando un valor inferior.

Los menores valores de rechazo se dan en aquellos ensayos con valor de número kappa menores (ensayos 9, 12, 13 y 14), ya que presentan mayor deslignificación. El ensayo 3 presenta valor de rechazo mayor a lo esperado, lo cual puede deberse al bajo valor de factor H con el cual fue realizada la cocción.

La diferencia en los valores de rechazo se relaciona con el grado de deslignificación, ya que, a menor contenido de lignina residual en la pulpa, menor es el valor del número kappa y la matriz se encuentra menos rígida. Esto implica que la etapa de refinación mecánica resulta más efectiva, ya que las fibras están más débilmente unidas. Como el proceso de refinación es más eficiente, queda un menor número de haces de fibras en la etapa del tamiz separador, resultando en un menor valor de rechazo.

Cuando se analizan ensayos con valores similares de número kappa, se observa que cuanto mayor es el valor del factor H, menor es el valor del rechazo.

En la tabla 11 se presentan los resultados de viscosidad para los ensayos realizados.

Tabla 11. Valores de viscosidad y número kappa

<b>N° de ensayo</b>	<b>Factor H (± 17)</b>	<b>Carga de álcali (%Na<sub>2</sub>O) (± 0,5)</b>	<b>Viscosidad (mL/ g)</b>	<b>Número Kappa</b>
1	733	13,4	209 ± 16	117,5 ± 5,8
2	721	17,1	319 ± 14	112,9 ± 8,0
3	733	19,5	659 ± 12	62,5 ± 3,8
4	973	16,5	413 ± 14	101,6 ± 0,8
5	909	18,7	520 ± 22	82,0 ± 3,0
6	1.092	12,9	348 ± 12	115,2 ± 0,8
7	1.077	16,0	626 ± 14	85,1 ± 5,8
8	1.082	17,1	789 ± 14	76,6 ± 0,6
9	1.084	19,1	957 ± 6	61,2 ± 0,2
10	1.268	14,0	741 ± 8	83,7 ± 1,2
11	1.266	14,5	1.018 ± 6	78,0 ± 1,4
12	1.260	15,0	869 ± 12	67,8 ± 1,0
13	1.265	16,1	1.284 ± 10	52,6 ± 2,4
14	1.258	16,8	1.199 ± 12	45,5 ± 2,4

Cuando se analizan los resultados dentro de un mismo rango de factor H se ve que la tendencia no es la esperada, ya que el valor de viscosidad aumenta cuando aumenta la carga de álcali. Al aumentar la carga de álcali se produce mayor grado de deslignificación, obteniendo pulpa con menor contenido de lignina residual (número kappa menor).

Las muestras ensayadas no se disolvieron completamente en la cuprietilendiamina y cuanto mayor es el número kappa (mayor contenido de lignina residual en la pulpa), mayor fue el porcentaje de la muestra que no se disolvió. En el material no disuelto se observaron fibras que se mantuvieron íntegras.

Esto podría deberse a que la pulpa con menor número kappa posee la celulosa más disponible para disolverse en la cuprietilendiamina, por lo que la fracción de pulpa que se disuelve es mayor, dando como resultado un mayor valor de la viscosidad.

Cuando se analizan muestras con contenido similar de lignina residual (valor de número kappa similar) se observa que el valor de viscosidad aumenta cuando se disminuye la carga de álcali (y se aumenta el factor H). La única excepción se presenta es el ensayo número 1. Este es la tendencia esperada, ya que al disminuir la carga de álcali las fibras se dañan menos durante el proceso de cocción.

A partir de la tabla 11, se puede concluir que para muestras con número kappa similar, aquellas que fueron realizadas con menor carga de álcali, son las que presentan mayor grado de polimerización. Se espera que las muestras con mayor grado de polimerización presenten mejores propiedades papeleras.

Las muestras con valor de kappa entre 80 y 85, que cumplan con el valor de álcali residual recomendado y los valores de viscosidad más altos, son

las seleccionadas para ensayar las propiedades papeleras. Estas son las condiciones 7 (factor H 1.077 y carga de álcali 16,0) y 10 (factor H 1.268 y carga de álcali 14,0).

### 10.3 Cocción para madera de turno final y raleo

Las mejores condiciones para realizar el pulpeo de madera de pino son las número 7 y 10. En base al análisis del rendimiento y rechazo se selecciona como condición a realizar las cocciones para obtener pulpa marrón a partir de madera de turno final y de raleo a la número 10 (factor H 1.268 y carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$ ) debido a que presenta mayor factor H y menor carga de álcali.

La pulpa obtenida con madera de turno final en estas condiciones presenta un valor de número kappa de  $72,0 \pm 0,9$  por lo que se ensaya esta madera con la misma carga y menor factor H (factor H 1.077 y carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$ ) con el fin de obtener un valor de número kappa cercano a 80.

Los resultados para las pulpas obtenidas con madera de turno final y madera de raleo se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Valores de rendimiento, rechazo, viscosidad y número kappa

	<b><i>Chips de aserradero</i></b>			
	<b>Turno final</b>	<b>Raleo</b>	<b>Muestra 10</b>	<b>Muestra 7</b>
Carga de álcali (%Na <sub>2</sub> O)	14 ± 0,5	14 ± 0,5	14 ± 0,5	16 ± 0,5
Factor H	1.077 ± 17	1.268 ± 17	1.268 ± 17	1.077 ± 17
Kappa	79,0 ± 2,0	80,0 ± 2,4	83,7 ± 1,2	85,1 ± 5,8
Rendimiento (%)	48,9 ± 1,2	50,7 ± 2,8	52,5 ± 1,4	60,7 ± 1,2
Rechazo (%)	0,3	0,9	0,3	1,1
Viscosidad (mL/ g)	938 ± 14	874 ± 6	741 ± 8	626 ± 14

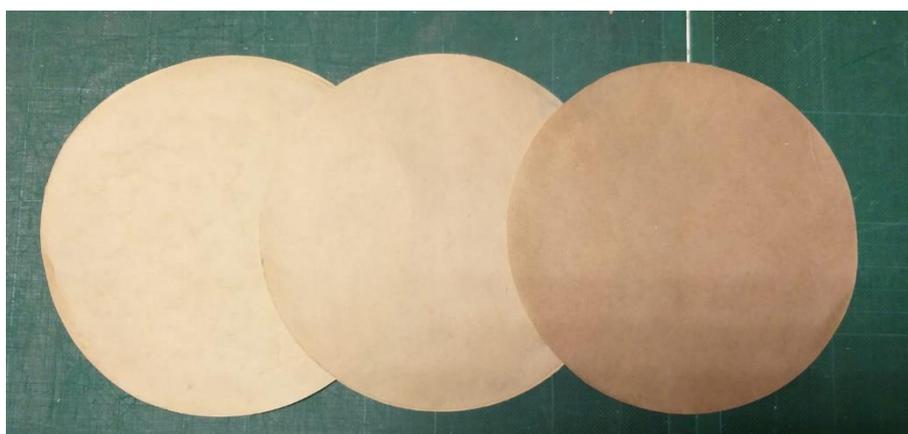
El valor de rendimiento de las pulpas obtenidas con madera de turno final y raleo es similar, aunque inferior al obtenido por la pulpa de la condición 10 (las tres muestras con carga de álcali 14 % como Na<sub>2</sub>O). Sin embargo, la condición 7 (carga de álcali 16 % como Na<sub>2</sub>O), presenta un valor de rendimiento superior (tabla 12).

La muestra de pulpa de madera de turno final presenta el mismo valor de rechazo que la muestra obtenida con la condición 10, sin embargo, la muestra de raleo presenta un valor de rechazo superior. Este es similar al que presenta la muestra obtenida con la condición 10 (tabla 12).

El valor de viscosidad que presenta la pulpa obtenida con madera de turno final es superior al que presenta la pulpa obtenida con madera de raleo. Ambos son superiores a los obtenidos con las condiciones 7 y 10 (tabla 12).

#### 10.4 Pulpas comerciales

Previo a los ensayos de propiedades papeleras a las muestras comerciales “Low Kappa” (Low) y “Light Colour” (Light) se les determina el valor de número kappa y viscosidad. Para la muestra “low” el valor de número kappa es de  $33 \pm 3,0$  y el valor de viscosidad es de  $(973 \pm 4)$  mL/ g mientras que para la muestra light el valor de número kappa es de  $40 \pm 3,6$  y el valor de viscosidad es de  $(882 \pm 4)$  mL/ g. En la figura 28 se observan hojas manuales producidas a partir de las muestras comerciales y una producida con pulpa elaborada en el laboratorio.



*Figura 28. Hojas manuales. Al medio y a la izquierda muestras comerciales, a la derecha muestra producida en el laboratorio*

## 10.5 Propiedades papeleras

La notación que se utiliza en este ítem para las muestras a las cuales se les ensayaron propiedades papeleras es: “CA14” (madera de chips de aserradero, carga de álcali 14 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1.260), “CA16” (madera de chips de aserradero, carga de álcali 16 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1.080), “turno final” (madera de turno final, carga de álcali 14 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1.080), “raleo” (madera de raleo, carga de álcali 14 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1.260), “low” (muestra comercial Low Kappa) y “light” (muestra comercial Light Colour).

### 10.5.1 Drenabilidad

En la tabla 13 se observan los valores de drenabilidad para las condiciones ensayadas.

El punto correspondiente a 0 revoluciones del PFI no es informado por dos motivos. Primero, al utilizar pulpa con valor de número kappa cercano 80, las fibras presentan un elevado contenido lignina, por lo cual los enlaces entre fibras son escasas previo al proceso de refinación. Por esto, no se logra la formación de la hoja y no pueden medirse otras propiedades.

Previo al proceso de refinación tampoco se logra una suspensión homogénea, debido a la que fibra larga no presenta buen drenaje y sedimenta rápido. Esto implica que al momento de realizar la toma para la medida de CSF la masa muestreada sea sensiblemente menor que lo recomendado por el estándar. En consecuencia, los valores de CSF y masa obtenidos están por fuera del rango que el estándar recomienda informar.

Por estos motivos, el punto en cuestión se aleja sensiblemente de la tendencia de los valores de la tabla 13 y por ello no se contempla.

*Tabla 13. Drenabilidad como CSF (mL)*

Condiciones de ensayo	Numero de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	498	268	230
CA14	639	446	323
Low	613	391	300
Light	603	394	343
Raleo	650	520	420
Turno final	535	333	255

En la tabla 13 se observa la tendencia esperada, ya que el valor del CSF disminuye cuando aumenta el número de revoluciones del PFI, debido al fenómenos de fibrilación que ocurre durante la refinación.

La muestra de raleo y CA14 son las que presentan mayores valores de CSF, por lo que se espera que sean la muestra que presenten las hojas con la fibra menos dañada.

## 10.5.2 Gramaje

En la tabla 14 se informan los valores de gramaje para las muestras ensayadas a los 3 grados de refinados.

*Tabla 14. Valores de gramaje (g/ m<sup>2</sup>)*

Condiciones de ensayo	Numero de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	43,98	46,21	48,62
CA14	47,32	46,22	43,56
Low	49,99	50,75	50,59
Light	55,27	50,81	53,58
Raleo	48,07	47,95	48,69
Turno final	45,75	48,94	47,75

Los valores obtenidos de gramaje son inferiores al valor esperado de 60 g/ m<sup>2</sup>, esto es atribuido a que la suspensión realizada para formar las hojas

no es homogénea (tabla 14). Los datos obtenidos muestran que para aquellas condiciones con valor de número kappa menor (low y light), se obtienen valores de gramaje más altos, ya que presentan suspensiones más homogéneas.

### 10.5.3 Espesor

El valor de espesor es muy sensible a la variación del gramaje. Con el fin de disminuir la influencia que la variación del gramaje puede generar en el espesor, se normalizaron estas variables, con lo cual el análisis resulta más claro.

En la tabla 15, se presentan las curvas del cociente espesor sobre gramaje en función del número de revoluciones para las condiciones ensayadas.

Tabla 15. Valor del cociente espesor/gramaje ( $\mu\text{m}/(\text{g}/\text{m}^2)$ )

Condiciones de ensayo	Numero de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	18,87 <sup>aA</sup>	18,48 <sup>abA</sup>	17,79 <sup>bB</sup>
CA14	19,03 <sup>aA</sup>	19,54 <sup>aAB</sup>	19,11 <sup>aA</sup>
Low	18,14 <sup>aA</sup>	17,58 <sup>aBC</sup>	17,34 <sup>aBC</sup>
Light	18,03 <sup>aA</sup>	17,41 <sup>abBC</sup>	17,00 <sup>bBC</sup>
Raleo	18,30 <sup>aA</sup>	17,20 <sup>bBC</sup>	17,22 <sup>bBC</sup>
Turno final	17,25 <sup>aA</sup>	17,01 <sup>abC</sup>	16,43 <sup>bC</sup>

*Aquellos valores indicados con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa. La letra minúscula corresponde al análisis en filas (muestras) y la letra mayúscula a columnas (revoluciones).*

Se observa que dicho cociente disminuye al aumentar el grado de refino. Esta tendencia se debe al mayor número de enlaces que se generan con el aumento del grado de refino. Al producirse mayor fibrilación se abren las capas externas de las fibras, permitiendo mayor número y más estrechos enlaces entre las mismas y como consecuencia una hoja más compacta.

La muestra CA14 no presenta diferencia estadísticamente significativa entre los puntos de refino, además de presentar los valores más elevados lo cual indica una mayor resistencia de la fibra. El comportamiento concuerda con los valores de CSF de la tabla 12.

Un comportamiento no esperado, es que la muestra CA16 presenta hojas poco compactas, sin embargo, muestra valores de CSF similares a las

muestras comerciales. Las dos muestras (CA14 y CA16) que presentan las hojas menos compactas y más alejadas de las muestras comerciales, son las realizadas en el laboratorio con la misma madera (chips subproductos de aserradero).

Aunque la muestra turno final parecería presentar las hojas más compactas, no se observa diferencia estadística con las muestras de raleo y las comerciales.

#### 10.5.4 Permeabilidad al aire

En la tabla 16 se presenta el valor de permeabilidad al aire en función del número de revoluciones para las muestras ensayadas.

Tabla 16. Valor promedio de permeabilidad al aire (s) con error estándar.

Condiciones de ensayo	Numero de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	12,3 ± 3,1 <sup>cC</sup>	115 ± 21 <sup>bAB</sup>	185 ± 48 <sup>aA</sup>
CA14	18,3 ± 5,2 <sup>cAB</sup>	27,3 ± 6,1 <sup>bC</sup>	53,4 ± 9,9 <sup>aB</sup>
Low	13,7 ± 3,1 <sup>cBC</sup>	99 ± 29 <sup>bA</sup>	188 ± 46 <sup>aA</sup>
Light	23,9 ± 5,1 <sup>cA</sup>	124 ± 26 <sup>bA</sup>	184 ± 52 <sup>aA</sup>
Raleo	8,8 ± 1,1 <sup>cC</sup>	67 ± 22 <sup>aB</sup>	58 ± 13 <sup>aB</sup>
Turno final	19,6 ± 4,2 <sup>cAB</sup>	84 ± 21 <sup>bB</sup>	206 ± 45 <sup>aA</sup>

Aquellos valores indicados con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa. La letra minúscula corresponde al análisis en filas (muestras) y la letra mayúscula a columnas (revoluciones).

La tendencia que se evidencia muestra que el valor de permeabilidad al aire aumenta al aumentar el número de revoluciones por minuto. Como ya se mencionó como consecuencia del mayor refinado se obtienen hojas menos porosas.

A excepción de la muestra raleo, existen diferencias estadísticamente significativas en todas las muestras entre los tres puntos de refinado. En el caso de la muestra raleo, se observa que el punto a 9.000 revoluciones tiene un valor de permeabilidad al aire superior a lo esperado, lo que implicaría que este punto se encuentra a un mayor grado de refinado. Esto también puede notarse en la tabla 13, donde dicho punto presenta un valor inferior a la tendencia.

Al analizar las distintas muestras a un mismo grado de refino, se observa que a 12.000 revoluciones se separan en dos grupos (tabla 16). Uno de ellos contiene las muestras CA14 y raleo, que fueron realizadas en las mismas condiciones de cocción (carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$  y factor H 1.260). La muestra CA14 es la que tiene el valor de permeabilidad al aire menor, lo que refuerza la hipótesis mencionada anteriormente.

En el otro se agrupan las dos muestras comerciales (menor kappa), junto con las muestras CA16 (realizada con mayor carga) y la muestra de turno final (condición de cocción más leves). Esto podría indicar que el aumentar la carga de álcali o el uso de madera de turno final, reduce la energía necesaria para el refino.

#### 10.5.5 Opacidad

En la tabla 17, se presenta el valor de opacidad en función del grado de refino para las muestras ensayadas.

Tabla 17. Valor promedio de opacidad (%) con error estándar.

Condiciones de ensayo	Número de Revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	89,4 ± 2,1 <sup>aD</sup>	90,7 ± 0,6 <sup>aB</sup>	90,4 ± 1,0 <sup>aB</sup>
CA14	92,8 ± 1,3 <sup>bBC</sup>	91,4 ± 1,2 <sup>aB</sup>	90,7 ± 0,7 <sup>aB</sup>
Low	93,0 ± 1,4 <sup>aBC</sup>	91,6 ± 2,1 <sup>aB</sup>	91,6 ± 1,1 <sup>aB</sup>
Light	94,1 ± 0,9 <sup>bAB</sup>	93,7 ± 1,2 <sup>bA</sup>	91,5 ± 1,1 <sup>aB</sup>
Raleo	95,9 ± 0,7 <sup>bA</sup>	93,7 ± 0,7 <sup>aA</sup>	94,2 ± 0,8 <sup>aA</sup>
Turno final	91,1 ± 2,4 <sup>bCD</sup>	90,9 ± 1,0 <sup>bB</sup>	88,3 ± 0,7 <sup>aC</sup>

*Aquellos valores indicados con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa. La letra minúscula corresponde al análisis en filas (muestras) y la letra mayúscula a columnas (revoluciones).*

En la tabla 17 se observa una leve tendencia a disminuir el valor de opacidad conforme aumenta el grado de refino. Esto es debido a que al aumentar el número de revoluciones se producen los fenómenos mencionados anteriormente (fibrilación externa, mayor número de enlaces y más resistentes) y en consecuencia se obtienen hojas menos opacas

El análisis estadístico no distingue ninguna tendencia clara del efecto del número de revoluciones sobre la opacidad de la pulpa. Aunque existen algunas diferencias estadísticamente significativas entre las muestras a un mismo número de revoluciones, a 12.000 los valores de las muestras realizadas en el laboratorio no tienen diferencia estadísticamente

significativa o son mayores que los valores de las muestras comerciales (con excepción de la muestra de turno final).

## 10.5.6 Resistencia al estallido

En la tabla 16 se presenta el índice de resistencia al estallido en función del grado de refino estallido para las muestras ensayadas.

Tabla 18. Valor promedio del índice de resistencia al estallido (kpa/ (g/m<sup>2</sup>)) con error estándar.

Condiciones de ensayo	Número de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	9,6 ± 1,4 <sup>aA</sup>	9,6 ± 1,0 <sup>aAB</sup>	10,5 ± 0,9 <sup>aAB</sup>
CA14	9,7 ± 1,1 <sup>aA</sup>	9,7 ± 1,0 <sup>aAB</sup>	10,4 ± 0,8 <sup>aAB</sup>
Low	8,2 ± 1,4 <sup>aA</sup>	8,9 ± 1,3 <sup>aB</sup>	9,0 ± 2,2 <sup>aB</sup>
Light	9,6 ± 1,6 <sup>aA</sup>	10,9 ± 2,3 <sup>aA</sup>	10,5 ± 1,2 <sup>aA</sup>
Raleo	9,3 ± 0,5 <sup>aA</sup>	9,8 ± 0,9 <sup>aAB</sup>	10,0 ± 0,7 <sup>aAB</sup>
Turno final	9,2 ± 1,4 <sup>abA</sup>	9,0 ± 0,6 <sup>bB</sup>	10,1 ± 0,5 <sup>aAB</sup>

*Aquellos valores indicados con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa. La letra minúscula corresponde al análisis en filas (muestras) y la letra mayúscula a columnas (revoluciones).*

En esta tabla 18, se observa una tendencia leve a aumentar el índice de resistencia al estallido cuando aumenta el grado de refino.

En el análisis estadístico no detecta diferencias entre los diferentes niveles de refinado para las distintas muestras.

Cuando se comparan las muestras a distintas revoluciones, tampoco se observa diferencia estadísticamente significativa (siendo siempre concordantes a pares). Por lo cual, los valores obtenidos para las muestras realizadas en el laboratorio se encuentran en el orden de los de las muestras comerciales. Inclusive, la muestra comercial low (menor valor de kappa), es la que presenta menores valores de resistencia al estallido.

#### 10.5.7 Resistencia al desgarro

En la tabla 19, se presenta el índice de resistencia al desgarro en función del grado de refinado para las muestras ensayadas.

Tabla 19. Valor promedio del índice de resistencia al desgarro (mN/ (g/m<sup>2</sup>)) con error estándar.

Condiciones de ensayo	Número de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	15,7 ± 1,4 <sup>aAB</sup>	14,8 ± 0,9 <sup>abB</sup>	14,2 ± 1,0 <sup>bA</sup>
CA14	16,3 ± 0,8 <sup>aA</sup>	16,0 ± 0,4 <sup>aA</sup>	14,8 ± 1,0 <sup>bA</sup>
Low	12,5 ± 0,8 <sup>aD</sup>	11,5 ± 1,3 <sup>aD</sup>	11,5 ± 0,8 <sup>aC</sup>
Light	13,8 ± 0,6 <sup>aC</sup>	11,4 ± 0,4 <sup>bD</sup>	11,5 ± 0,6 <sup>bC</sup>
Raleo	14,8 ± 0,7 <sup>aBC</sup>	13,3 ± 0,4 <sup>bC</sup>	12,9 ± 0,5 <sup>bB</sup>
Turno final	11,1 ± 0,6 <sup>aE</sup>	10,3 ± 0,1 <sup>bE</sup>	10,1 ± 0,5 <sup>bD</sup>

Aquellos valores indicados con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa. La letra minúscula corresponde al análisis en filas (muestras) y la letra mayúscula a columnas (revoluciones).

Los resultados obtenidos muestran que disminuye el valor del índice de resistencia al desgarro cuando aumenta el grado de refino.

La tendencia es opuesta a las demás propiedades analizadas, debido a que la resistencia al desgarro depende del largo de la fibra. Al aumentar el grado de refino se produce mayor daño mecánico de las fibras. Aunque aumenta el número total de enlaces en la hoja, los enlaces por fibra disminuyen cuando esta se acorta. Como cada fibra presenta menos enlaces, se requiere menos fuerza para separar una fibra de otra, facilitando el rasgado.

La mayoría de las muestras no presentan diferencias estadísticamente significativas entre los valores correspondientes a 9.000 y 12.000

revoluciones del PFI, por lo que el daño que se genera al aumentar el número de revoluciones no daña el largo de la fibra de forma significativa.

En la muestra CA14 se observan los mayores valores del índice de resistencia al desgarro, lo cual también indica que es la muestra con la fibra más resistente.

A excepción de la muestra de turno final, las demás muestras producidas en el laboratorio (CA14, CA16 y raleo), presentan valores de resistencia al desgarro más elevados que las muestras comerciales (con diferencia estadísticamente significativa).

La muestra turno final presenta los valores más bajos a todos los grados de refinado, además de haber presentado las hojas más compactas. En consecuencia, es la muestra más sensible al proceso de refinado, ya que un exceso de energía de refinado impacta negativamente en esta propiedad. Dicha muestra requirió condiciones de pulpeo más leves (menor carga de álcali y factor H), que las otras maderas.

#### 10.5.8 Resistencia a la tracción

En la tabla 20, se presenta el índice de resistencia a la tracción en función del grado de refinado para las muestras ensayadas.

Tabla 20. Valor promedio del índice de resistencia a la tracción (N/ (g/m<sup>2</sup>)) con error estándar.

Condiciones de ensayo	Número de revoluciones		
	6.000	9.000	12.000
CA16	1,24 ± 0,17 <sup>bA</sup>	1,36 ± 0,10 <sup>abBC</sup>	1,34 ± 0,12 <sup>aB</sup>
CA14	1,19 ± 0,12 <sup>aA</sup>	1,20 ± 0,12 <sup>aD</sup>	1,37 ± 0,10 <sup>aB</sup>
Low	1,22 ± 0,17 <sup>bA</sup>	1,40 ± 0,13 <sup>bAB</sup>	1,55 ± 0,16 <sup>aA</sup>
Light	1,32 ± 0,20 <sup>aA</sup>	1,51 ± 0,22 <sup>aA</sup>	1,53 ± 0,11 <sup>aA</sup>
Raleo	1,29 ± 0,10 <sup>aA</sup>	1,40 ± 0,13 <sup>aAB</sup>	1,49 ± 0,13 <sup>aA</sup>
Turno final	1,23 ± 0,17 <sup>aA</sup>	1,25 ± 0,16 <sup>aCD</sup>	1,50 ± 0,08 <sup>aA</sup>

*Aquellos valores indicados con la misma letra no presentan diferencia estadísticamente significativa. La letra minúscula corresponde al análisis en filas (muestras) y la letra mayúscula a columnas (revoluciones).*

En la tabla 20, se observa una tendencia de aumento del índice de resistencia a la tracción cuando aumenta el grado de refino.

El análisis estadístico no detecta diferencias estadísticamente significativas entre los distintos niveles de revoluciones para la mayor parte de las muestras. A 12.000 revoluciones los valores de todas las muestras producidas en el laboratorio raleo y turno final no presentan diferencia estadística con las muestras comerciales, mientras que las CA14 y CA16 obtienen valores por debajo de estas.

En la Figura 29, se presenta la relación entre el índice de resistencia a la tracción y el índice de resistencia al desgarró. Se observa una correlación

negativa, debido al compromiso que existe entre estas propiedades, ya que presentan tendencias opuestas.

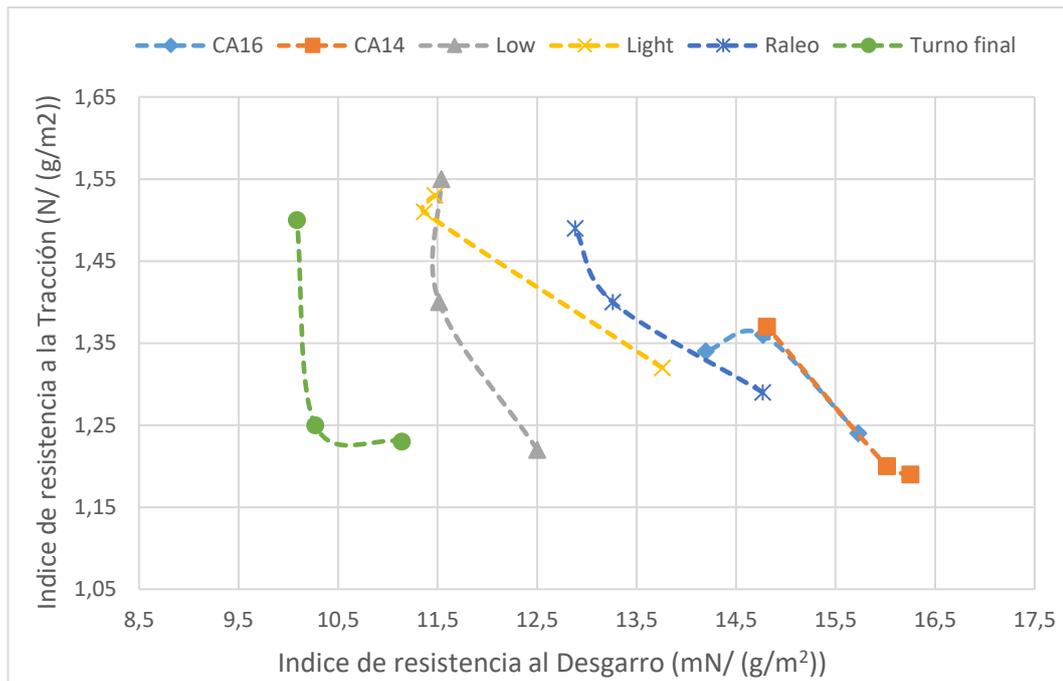


Figura 29. Valor del índice de resistencia a la tracción en función del índice de resistencia al desgarro

Al aumentar el grado de refino, la mayoría de las propiedades mejoran su desempeño, entre ellas el índice de resistencia a la tracción, aunque aumentar el grado de refino también genera un mayor daño a la fibra, repercutiendo negativamente en el índice de resistencia al desgarro.

A excepción de la muestra CA14, se observa que utilizar un mayor valor de revoluciones permite obtener hojas con mejores propiedades, ya que el índice de resistencia a la tracción aumenta hasta en 17 %, mientras que la reducción del índice de resistencia al desgarro es siempre menor al 4 %.

## **11 Cálculos preliminares para una planta de pulpa kraft marrón de pino**

Uno de los resultados obtenidos por el proyecto realizado en el marco de la propuesta para fomentar el desarrollo del sector forestal-maderero impulsado por la OPP, fue que es económicamente rentable la instalación en Uruguay de una planta que produzca papel marrón (Dieste, et al., 2018).

En este ítem, se presentan cálculos preliminares para una planta que produzca 330.000 toneladas de pulpa marrón seca anuales, que es el principal insumo para la producción de papel marrón y que produzca como subproducto 12.900 toneladas de Tall oil anuales (Dieste, et al., 2018).

Cuando se utiliza como única materia prima chips subproductos de aserrados (rendimiento 52,5 % y rechazo 0,3 %), el consumo de madera seca es de 630.457 toneladas anuales (sin considerar el porcentaje de chips aceptados durante el proceso de tamizado de 85 %). Al utilizar solamente madera de raleo (rendimiento 50,7 % y rechazo 0,9 %), el consumo de madera seca aumenta a 656.746 toneladas anuales. Mientras que si la totalidad de la madera es de turno final (rendimiento 48,9 % y rechazo 0,3 %), el consumo de madera seca es aún mayor, 676.871 toneladas anuales.

La proyección más probable, es que el consumo de madera resulte de una mezcla de chips subproducto de aserradero y madera de raleo, debido al

mayor costo de la madera de turno final. Para estimar con mayor precisión el consumo de madera es necesario conocer la composición de dicha mezcla. Esta quedará determinada por la accesibilidad de la madera (volumen disponible al que se pueda acceder) y un análisis económico.

Los chips subproductos de aserradero tienen un menor costo como materia prima, pero mayor costo de transporte que la madera de raleo, debido a que los chips presentan menor densidad a granel que las trozas. También debe considerarse que el volumen de chips se encuentra condensado en una sola ubicación (el aserradero), mientras que las trozas de raleo se encuentran dispersas por varias plantaciones, lo cual complejiza y encarece la logística y el transporte. Por lo tanto, la localización de la planta y su cercanía con las potenciales fuentes de madera es un factor de fuerte influencia en la distribución de costos.

Para una planta de pulpa kraft marrón moderna, el máximo consumo de agua es de 15 m<sup>3</sup> por tonelada de pulpa AD (air dry – secada al aire, humedad 10 %) (Kaihonen, et al., 2021). Considerando este valor (estimación conservadora), el consumo de agua de la planta es de 4.950.000 m<sup>3</sup> anuales.

Para el ciclo de recuperación de químicos se considera una disposición del 90 % de la cal quemada, que la cal residual en el lodo de cal es del 4 % y que el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) residual en la cal quemada es del 3 %. En cuanto al licor, la reducción del licor blanco se estima en 86 %

(expresado como porcentaje de  $\text{Na}_2\text{S} / (\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{SO}_4)$ ), la causticidad en 82 % y el porcentaje de tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) en el licor blanco en 31 % (expresado como porcentaje de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4)$ ).

Con los datos antes mencionados, considerando como única materia prima los chips subproducto de aserradero y seleccionando como condiciones de cocción una carga de álcali del 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$  y sulfidez 30 % la composición del licor blanco resultante (tabla 21). El consumo de cal (óxido de calcio,  $\text{CaO}$ ) requerido para la recuperación del licor blanco es de 74.784 toneladas anuales (0,21 ton/ ton de pulpa AD).

Tabla 21. Composición del licor blanco

<b>Compuesto</b>	<b>concentración (gNaOH/ L)</b>
NaOH	31,7
$\text{Na}_2\text{S}$	13,5
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	6,9
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1,51
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	0,67
<b>Alcalinidad total</b>	<b>54,3</b>

Para el balance sodio azufre, se consideran pérdidas líquidas (10 Kg de Na/ ton de pulpa y 2 kg de S/ ton de pulpa), pérdidas de polvo (2 Kg de Na/ ton de pulpa y 1,2 kg de S/ ton de pulpa) y generación de gases sulfurosos (4 kg de S/ ton de pulpa). Además, se considera el aporte de azufre del fuel oil al horno de cal (3 kg de S/ ton de pulpa).

Con estos valores, la reposición necesaria para cerrar el balance de sodio y azufre son 5.522 ton de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  anuales (15,5 kg  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ / ton de pulpa AD) y 7.387 ton de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anuales (18,5 kg  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ / ton de pulpa AD). El diagrama de vector correspondiente al balance se ve en la Figura 30.

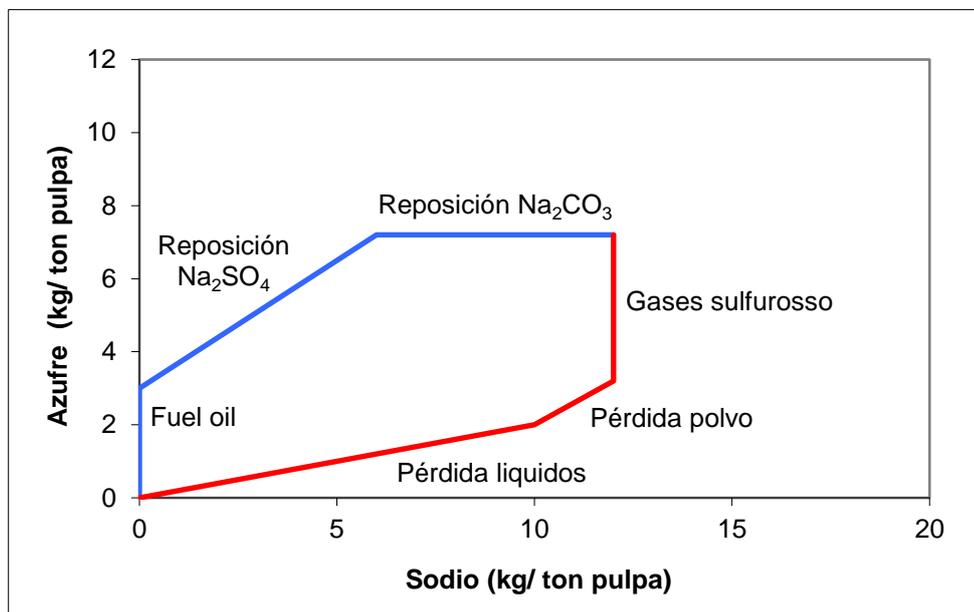


Figura 30. Diagrama de vector del balance sodio azufre.

A partir de datos experimentales, la producción de licor negro se estima en 9 m<sup>3</sup> por tonelada de pulpa AD a la salida del reactor. El contenido de lignina en el licor negro es de 17,32 Kg/ m<sup>3</sup> de licor negro y el contenido de sólidos disueltos es de 125 kg/ m<sup>3</sup> de licor negro (13,8 g de lignina/ g de solidos disueltos).

## 12 Conclusiones

En cuanto a la materia prima, los chips producidos como subproducto de la industria de madera aserrada presentan distribución de tamaño adecuada para la producción de pulpa celulosa, ya que el 85 % de estos chips son clasificados como aceptados. Además, el 11 % que son clasificados con tamaño superior al aceptado pueden ser re-chipeados. Esto los convierte en una fuente viable de materia prima para una planta de pulpa kraft.

Los chips de residuos de aserraderos, la madera de turno final y la madera de raleo tienen composición química similar. Se encontró variación en los valores de densidad básica de los tres tipos de madera. La madera de chips de aserradero y de turno final (mayor edad de corte) presentaron los valores de densidad básica más elevados, mientras que la madera de raleo (menor edad de corte) presentó los valores de densidad básica menores.

Se cumplió el objetivo de obtener pulpa kraft marrón con los tres tipos de madera, variando la carga de álcali y el factor H. Para obtener pulpa con valor de número kappa en el entorno de 80 se utiliza la misma carga de álcali y factor H (carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$  y H 1.260) para los chips de residuos de aserradero y la madera de raleo, mientras que la madera de turno final requiere condiciones más leves (carga de álcali 14 % como  $\text{Na}_2\text{O}$  y H 1.080).

La pulpa producida en el laboratorio con chips de aserradero y mayor carga de álcali (carga de álcali 16 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1.080), presenta mayor valor de rendimiento ( $65,0 \pm 1,4$  %) y rechazo (1,1 %) que la producida con la misma madera y menor carga de álcali (carga de álcali 14 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1260) (rendimiento  $52,5 \pm 1,4$  % y rechazo 0,3 %), con valores similares de número kappa (CA16  $85,1 \pm 5,8$  y CA14  $83,7 \pm 1,2$ ).

La madera de raleo (ensayada en las mismas condiciones que CA14), presenta valores de número kappa ( $80,0 \pm 2,8$ ) y rendimiento ( $50,7 \pm 2,8$  %) similares a los de CA14, aunque el valor de rechazo es un poco mayor (0,9 %).

La madera de turno final, ensayada en las condiciones más leves (carga de álcali 14 % como Na<sub>2</sub>O y factor H 1.080), alcanza un valor de número kappa similar a las otras muestras ( $79,0 \pm 2,0$ ), aunque tiene valores de rendimiento y rechazo menores (rendimiento  $48,9 \pm 1,2$  % y rechazo 0,3 %).

En el análisis de propiedades papeles se puede observar que la pulpa producida con chips de aserradero, CA14 presenta la mejor calidad. Esto podría deberse a que es obtenida con los árboles de mayor edad, y por lo tanto con la fibra más larga. Además, esta madera fue la que presentó menor contenido de lignina.

Lo anterior queda en evidencia con el valor de Canadian Standard Freeness y del índice de resistencia al desgarro, ya que es la muestra con

los valores más elevados a los tres grados de refino. Además, presenta las hojas menos compactas.

Así mismo, la pulpa producida con madera de turno final es la que requiere menos refino, ya que presenta las hojas más compactas y valores de índice de resistencia al desgarro bajo.

Cuando se comparan las pulpas obtenidas en el laboratorio con muestras comerciales se ve que a pulpa producida con madera de turno final presenta una tendencia similar a la muestra comercial light. Aunque existe diferencias estadísticamente significativas ya que la pulpa comercial produce algunos valores ligeramente superiores.

Por otro lado, la pulpa producida con madera de raleo y la muestra comercial "low" presentan mejores resultados cuando se aumenta el grado de refino, ya que no existe deterioro en el índice de resistencia al desgarro, pero si aumento en el índice de resistencia a la tracción.

En base a las propiedades ensayadas, se puede concluir que las muestras comerciales y las producidas en el laboratorio presentan diferencias menores. Pudiéndose utilizar las tres maderas ensayadas para producir pulpa kraft marrón con calidad suficiente para su comercialización.

Como trabajos a futuros, puede analizarse la influencia del agregado de ramas a las maderas de turno final y a la de raleo. Además, ensayar las mismas condiciones de cocción (carga de álcali y factor H) en una muestra de madera compuesta por una fracción de chips de aserraderos y madera

de raleo. Corroborando si en esta situación, más cercana a la proyección real, se obtiene propiedades papeleras adecuadas para comercializar la pulpa.

## 13 Bibliografía

Administración del mercado eléctrico, 2019. *Administración del mercado eléctrico*. [En línea]

Available at: <http://adme.com.uy/>

[Último acceso: 01 04 2019].

Administración del Mercado Eléctrico, 2020. *Informe anual 2020*,

Montevideo : ADME .

Akgul, M., Copur, Y. & Temiz, S., 2007. A comparison of kraft and kraft-sodium borohydrate brutia pine pulps. *Building and Environment*, 42(7), p. 2586–2590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.022>.

Alén, 2000. *Basic Chemistry on Wood Delignification, in Stenius..* Tercera. pp. 58-104 ed. FAPET: Forest Products Chemistry, Papermaking Science and Technology.

Amorín, C., 2019. *Informe ambiental resumen*. Durazno: Estudio ingeniería ambiental .

Artonic, 2020. *Schafer Hardwood*. [En línea]

Available at: <https://www.v3-usa.com/learn/comparing-plain-sawn-quarter-sawn-rift-sawn-flooring/>

[Último acceso: 12 03 2020].

Aziz, A., Myers, G. & Abubakr, S., 2001. *Packaging grade kraft pulp from small-diameter softwood*, Boston: TAPPI pulping/process and product quality conference.

Biermann, C. J., 1996. *Handbook of pulping and papermaking*. Corvallis, Oregon: Academic press. ISBN -13: 978-0-12-097362-0.

Boscana, M. & Boragno, L., 2020. *Estadísticas Forestales 2020*, Montevideo: Dirección General Forestal - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

Boscana, M. & Boragno, L. B., 2018. *Estadísticas Forestales 2018*, Montevideo: Dirección General Forestal - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

Brännvall, E., 2009. *Pulping Technology. Pulping Chemistry and Technology*. Segunda. pp 121- 148. ISBN 978-3-11-021341-6 ed. Berlin: De Gruyter. Ek, Monica; Gellerstedt, Göran; Henriksson, Gunnar.

Copur, Y. & Tozluoglu, A., 2008. A comparison of kraft, PS, kraft-AQ and kraft-NaBH<sub>4</sub> pulps of Brutia pine. *Bioresource Technology*, 99(5), p. 909–913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.015>.

Correia, F., d'Angelo, J. & Jr, F., 2019. Revisitando número Kappa: conceitos e aplicações na indústria de celulose. *O papel - Artigo técnico*, 80(07), pp. 77 - 89.

Díaz, N. P., 2007. *Compostaje de corteza de las especies Eucalyptus saligna Smith, y Eucalyptus pellita F. Muell en la obtención de compost como fuente de sustrato para viveros forestales*. Pinar del Río: Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias. Universidad del Pinar del Río.

Dieste, A., 2012. *Programa de promoción de exportaciones de productos de madera*, Montevideo: Consejo Sectorial Forestal-Madera.

Dieste, Andrés; Baño, Vanesa; Cabrera, Maria Noel; Clavijo, Leonardo; Palombo, Viviana; Moltini, Gonzalo; Cassella, Francisco, 2018. *Forest-based Bioeconomy Areas- Strategic products from a technological point of view*, Montevideo : s.n.

FAO, 2019. *food and agriculture organization of the united nations*. [En línea]

Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO/visualize>

[Último acceso: 02 04 2019].

FAO, 2020. *Capacidades de pasta y papel*, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. ISSN 0255-7665.

Färlin, A., 2008. *Analysis of chip quality and value at Norske Skog Pisa Mill, Brazil*, Uppsala: Department of Forest Products. ISSN 1654-1367.

Fleming, B. I. & Kubes, G. J., 1985. The viscosities of unbleached alkaline pulps. IV. The effect of alkali. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 5(2), pp. 217-227. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773818508085189>.

Forest Products Laboratory, 2010. *Wood Handbook*. Madison, Wisconsin  
Unidos: Centennial Edition.

Forest Products Laboratory, 2010. *Wood Handbook*. Madison, Wisconsin  
Unidos: Centennial Edition.

Fuenmayor, R., Carmen, A., Vera, F. & Miguel, A., 2007. *Evaluación del efecto de la carga alcalina y factor H en el pulpeo kraft de Pinus Caribaea var. hondurensis de las plantaciones de CVG-PROFORCA – Venezuela*, Mérida: COPÉRNICO Revista Arbitrada Interdisciplinaria.

Gabriel-Parra, Rosalío; Rutiaga-Quiñones, José Guadalupe; Orihuela-Equihua, Rocío; Rivera-Prado, José de Jesús; Sanjuán-Dueñas, Rubén; Carrillo-Parra, Artemio, 2018. Calidad de pulpa Kraft de *Pinus pseudostrobus* L. obtenida a partir de astilla industrial. *Madera y Bosques*, 24(2), p. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421816> .

Gulsoy, S. K. & Ozturk, F., 2015. Kraft pulping properties of European black pine cone. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(4), pp. 775-782.  
DOI:10.4067/S0718-221X2015005000076.

Haggith, Mandy; Kinsella, Susan; Baffoni, Sergio; Anderson, Patrick; Ford, Jim; Leithe, Rune; Neyroumande, Emmanuelle; Murtha, Neva; Tinhout, Bas, 2018. *The State of the Global Paper Industry*. s.l.:Environmental paper network.

Hortling, B., Tamminen, T. & Pekkala, O., 2001. Effects of delignification on residual lignin-carbohydrate complexes in normal pine wood and pine

wood enriched in compression wood. 1. Kraft pulping. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 16(3), pp. 219-224. DOI:  
<https://doi.org/10.3183/npprj-2001-16-03-p219-224>.

Huang, F. & Ragauskas, A., 2013. Extraction of Hemicellulose from Loblolly Pine Wood chips and Subsequent Kraft Pulping. *industrial and engineering chemistry research*, 52(4), p. 1743–1749. DOI:  
<https://doi.org/10.1021/ie302242h>.

ISO Standard No. /AWI 23774, 2016. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Pulps — Kraft liquor — Total, active and effective alkali (Potentiometric titration).

ISO Standard No. 187, 1990. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper, board and pulps - Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples.

ISO Standard No. 1974, 2012. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper — Determination of tearing resistance — Elmendorf method.

ISO Standard No. 2471, 2008. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems:

Paper and board — Determination of opacity (paper backing) — Diffuse reflectance method.

ISO Standard No. 2758, 2014. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Determination of bursting strength.

ISO Standard No. 2759, 2014. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Determination of bursting strength.

ISO Standard No. 302, 2015. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Pulps — Determination of Kappa number.

ISO Standard No. 3036, 1975. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Determination of puncture resistance.

ISO Standard No. 3037, 2013. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Corrugated fibreboard — Determination of edgewise crush resistance (unwaxed edge method).

ISO Standard No. 3689, 1983. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper and board — Determination of bursting strength after immersion in water.

ISO Standard No. 3781, 2011. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper and board — Determination of tensile strength after immersion in water.

ISO Standard No. 5264-2, 2011. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Pulps — Laboratory beating — Part 2: PFI mill method.

ISO Standard No. 5269-2, 2004. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Pulps — Preparation of laboratory sheets for physical testing — Part 2: Rapid-Köthen method.

ISO Standard No. 534, 2011. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Determination of thickness, density and specific volume.

ISO Standard No. 5351, 2010. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Determination of limiting viscosity number in cupri-ethylenediamine (CED) solution.

ISO Standard No. 536, 2019. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper and board — Determination of grammage.

ISO Standard No. 5626, 1993. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper — Determination of folding endurance.

ISO Standard No. 5636-5, 2013. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Paper and board — Determination of air permeance (medium range) — Part 5: Gurley method.

ISO Standard No. AWI 23772, 2016. *International Organization for Standardization*. Occupational health and safety management systems: Pulps — Kraft liquor — Residual alkali (Hydroxide ion content).

Kaihonen, Kari; Nyström, Jari; Lintunen, Taina; Hakonen, Laura; Kittilä, Mikko; Dahlman, Tuomo; Kittilä, Juha, 2021. *Know Pulp*. [En línea]

Available at: [www.knowpulp.com](http://www.knowpulp.com)

[Último acceso: 01 04 2021].

Koch, G., 2006. *Raw Material for Pulp. Handbook of Pulp*. Sixta, Herbert. pp 21 - 68. ISBN 3-527-30997-7 ed. Weinheim: Wiley-VCH..

Krotscheck, A. W., 2006. *Pulp Washing. Handbook of pulp*. Sixta, Herbert. pp 511-560. ISBN 3-527-30997-7 ed. WeinHeim: Wiley-VCH.

Kube, G. J., Macleod, J. M., Fleming, B. I. & Bolker, H. I., 1981. The Viscosities of Unbleached Alkaline Pulps. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 1(1), pp. 1-10. DOI:

<https://doi.org/10.1080/02773818108085090>.

Kubes, G. & Fleming, B. I., 1984. Viscosities of Unbleached Alkaline Pulps. III. Wood Species. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 4(4), pp. 459-464. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773818408070661>.

Mansfield, S. D., Wong, K. K. Y. & Dickson, A. R., 2000. Variation in the response of three different *Pinus radiata* kraft pulps to xylanase treatments. *Wood and fiber science: journal of the Society of Wood Science and Technology*, 32(1), pp. 105-115.

Martinez Neira, P. A., 2012. *Efecto del sobre espesor de las astillas de Pinus radiata en el proceso de cocción kraft*, Minas Gerais: s.n.

MGAP-MIEM-MVOTMA, 2015. *Probio - producción de electricidad a partir de biomasa*. [En línea]

Available at: <http://www.probio.dne.gub.uy/cms/>

[Último acceso: 19 07 2021].

MIEM, 2019. *Balance energetico nacional del Uruguay*. [En línea]

Available at: <https://ben.miem.gub.uy/>

[Último acceso: 04 02 2019].

Ministerio de Industria, E. y. M., 2021. *Balance energético nacional Uruguay*. [En línea]

Available at: <https://ben.miem.gub.uy/fuentsp8.html>

[Último acceso: 10 03 2021].

Pettersen, R. C., 1984. *The Chemical Composition of Wood - Chapter 2 pp: 57-126*. Madison: American Chemical Society.

Real academia española, 2021. *Diccionario de la lengua española*, 23.<sup>a</sup> ed., [versión 23.4 en línea]. [En línea]

Available at: <https://dle.rae.es/pergamino>

Ressel, J. B., 2006. *Wood Yard Operations. Handbook of pulp*. Sixta, Herbert. pp 69 - 108. ISBN 3-527-30997-7 ed. Weinheim: Wiley-VCH.

SCAN-CM 40:01, 2001. *Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee*. Length and length distribution, width and width distribution: wood chips for pulp production – size distribution.

Shin, S.-J., Schroeder, L. R. & Lai, Y.-Z., 2004. Impact of Residual Extractives on Lignin Determination in Kraft Pulps. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 24(2), pp. 139–151. DOI: <https://doi.org/10.1081/WCT-200026567>.

Sixta, H., 2006. *Introduction. Handbook of Pulp*. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 3-527-30997-7.

Sixta, H., Potthast, A. A. & Krottschek, W., 2006. *Chemical Pulping Processes. Handbook of pulp*. Sixta, Herbert; pp 109 - 510. ISBN 3-527-30997-7 ed. Weinheim: Wiley-VCH.

Sjöström, E. & Alén, R., 1999. *Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking*. s.l.:Springer Series in Wood Science. ISBN 978-3-662-03898-7.

Sluiter, A.; Ruiz, R; Scarlata, C; Sluiter, j; Templeton, D., 2008. *Technical Report, Determination of Extractives in Biomass*, s.l.: National Renewable Energy Laboratory .

Sluiter, A.; Ruiz, R; Scarlata, C; Sluiter, j; Templeton, D., 2012. *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass*, s.l.: International Renewable Energy Laboratory.

Tamosiunas, M. E. A., 2018. *Resultados de la cartografía forestal nacional* , Montevideo: Dirección General Forestal.

TAPPI Test Method T 211 om-02, 2007. *Technical Association for the Pulp and Paper Industries. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C*. Atlanta, Georgia. USA: TAPPI Press.

TAPPI Test Method T 227 om-17, 2007. *Technical Association for the Pulp and Paper Industries. Freeness of pulp (Canadian standard method)*. Atlanta, Georgia. USA: TAPPI Press.

TAPPI Test Method T 258 om-02, 2006. *Technical Association for the Pulp and Paper Industries. Basic density and moisture content of pulpwood*. Atlanta, Georgia. USA: TAPPI Press.

TAPPI Test Method T 494 om-01, 2006. *Technical Association for the Pulp and Paper Industries. Tensile properties of paper and paperboard*. Atlanta, Georgia. USA: TAPPI Press.

TAPPI Test Method T 569 om-14, 2006. *Technical Association for the Pulp and Paper Industries. Internal bond strength*. Atlanta, Georgia. USA: TAPPI Press.

Tejedor, A. S., 2019. *Química Orgánica Industrial*. [En línea]  
Available at: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>

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

Ucar, G. & Balaban, M., 2004. Accurate determination of the limiting viscosity number of pulps. *Wood Sci Technol*, Volumen 38, pp. 139–148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0218-0>.

Uruguay XXI, 2016. *Informe del sector forestal en Uruguay*, Montevideo: Uruguay XXI. Promoción de inversiones, exportaciones e imagen del país.

Uruguay XXI, 2018. *Oportunidades de inversión*, Montevideo: Uruguay XXI. Promoción de inversiones, exportaciones e imagen del país.

Vivian, Magno Alan; Simkunas Segura, Tiago Edson; Bonfatti Júnior, Eraldo Antonio; Sarto, Camila; Schmidt, Flavia; Gomes da Silva Júnior, Francides; Gabov, Konstantin; Fardim, Pedro, 2015. Wood quality of *Pinus taeda* and *Pinus sylvestris* for kraft pulp production. *Scientia Forestalis*, 43(105), pp. 183-191.

Yoon, S. H. & van Heiningen, A., 2008. Kraft pulping and papermaking properties of hot-water pre-extracted loblolly pine in an integrated forest products biorefinery. *Tappi Journal*, 7(7), pp. 22-27.