

Interrelación entre las propiedades de una celulosa kraft y la materia prima usada para su fabricación

Roberto Melo S.
José Paz P.

Virginia Carrasco B.
Nelson Bello T.

Laboratorio de Productos Forestales, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Concepción.
Casilla 53-C, Concepción - Chile

1. SUMARIO

Las características biométricas de las fibras de madera tienen una incidencia reconocida en las propiedades de la pulpa celulósica.

Las plantaciones de pino insigne (**Pinus radiata D. Don**) abastecen, prácticamente en forma exclusiva, en nuestro país, a las fábricas de este producto y, como el área pinera es bastante extensa, está sujeta a variantes que influyen las características de la madera y de sus fibras.

El estudio realizado, financiado por el Fondo de Desarrollo Productivo de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y la Empresa Forestal Celco Ltda., tendió a determinar las características biométricas de las fibras de pino insigne que crece en Chile, y su influencia en las propiedades de la pulpa, en función de la procedencia geográfica, la edad de los árboles, la clase diamétrica y la posición en el fuste, en altura y diámetro.

El material recogido en diferentes zonas del área pinera se calificó desde los puntos de vista físico y macroestructural de las fibras en conjunto con las propiedades mecánicas de las pulpas.

La procedencia de la madera no presenta una tendencia clara sobre las propiedades de las fibras y de las pulpas pero se demuestra que las características biométricas de las fibras, influidas por la edad y la posición en el fuste, preferentemente, afectan, en forma importante, las propiedades mecánicas de las pulpas.

2. INTRODUCCION

La disponibilidad creciente de madera proveniente de las extensas plantaciones de pino insigne (**Pinus radiata D. Don**) en nuestro país, exige, en forma perentoria, una preocupación por su aprovechamiento, considerando la más adecuada diversificación de los productos y la optimización de los procesos de producción.

Desde el punto de vista de la fabricación de pulpa de madera, o celulosa como se la denomina corrientemente, y papel, la especie pino insigne constituye una materia prima que hemos estado utilizando prácticamente, en forma exclusiva, para su fabricación. El costo relativamente bajo de su madera y la calidad aceptable de las fibras favorecen su competencia en los mercados de exportación y la hacen aparecer como la más importante, desde el punto de vista económico, para nuestro país.

Como consecuencia de los patrones de crecimiento, esta madera presenta un amplio rango de tipos de fibras, cuya variabilidad influye en forma decidida en las propiedades de los productos intermedios y finales. Su utilización masiva previsible por largo tiempo en adelante, hace recomendable el reconocimiento y la utilización de los atributos de las fibras, como apoyo para definir su empleo óptimo.

Se reconoce que algunas fibras son mejores para la fabricación del papel, dependiendo de su uso final; sin embargo, la información existente acerca de la influencia de las características de las fibras sobre las propiedades de la hoja es, más bien, limitada en nuestro país.

Entre los atributos de las fibras, su biometría tiene una incidencia reconocida en la calidad del producto celulósico. Aunque el proceso de fabricación permite alguna flexibilidad, no es posible alterar, fundamentalmente, el comportamiento de estos elementos celulares, que ya traen un sello definido, como consecuencia de las características genéticas de la especie y de las condiciones de crecimiento de los individuos. Eventualmente, una modificación del comportamiento exigirá la adición de elementos extraños, con el consiguiente mayor costo de fabricación de los papeles.

De aquí que el conocimiento de las propiedades biométricas de las fibras y su variación permitirá dirigir la formulación del abastecimiento de las fábricas de productos celulósicos tendiendo a la optimización de su calidad. En plazos mediano y largo podrían considerarse intervenciones en el manejo de las plantaciones y de mejoramiento genético para inducir la generación de las propiedades que interesen.

Estudios efectuados en el exterior, especialmente en Australia y Nueva Zelanda, en el caso de pino insigne, han buscado establecer la influencia de las características físicas y químicas de las fibras. Sin embargo, no es fácil aislar los elementos de variación, que siempre se presentan simultáneamente, distorsionando los resultados y perturbando las conclusiones.

En general, hay acuerdo en que la longitud de las fibras y la densidad de la madera son dos factores que revisten importancia, siendo esta última una resultante de la participación fundamental de las características de la pared celular (Watson, 1961-62) (Harris, 1965) (Hiatt, 1960). Normalmente se encuentra una variación en la longitud de las fibras que crecen a medida que se alejan desde la médula; en los 10 a 15 primeros anillos este crecimiento es muy pronunciado, haciéndose más reducido después de esta fase.

La densidad sigue un patrón similar, influida por la fuerte proporción de madera de primavera en los primeros anillos anuales alrededor de la médula. Avanzando hacia la corteza los anillos se estrechan y comienza a pesar la influencia de la madera de verano, cuyas células se caracterizan por poseer paredes más gruesas.

La zona central, alrededor de la médula, hasta una distancia que no está bien determinada pero que se estima en alrededor de 10 anillos de crecimiento en pino insigne, toma el nombre de madera juvenil o de corazón, y se caracteriza por contener células cortas con ángulo fibrilar abierto, además de baja densidad (Cown, 1974) (Uprichard, 1971).

La zona anular externa a la madera juvenil toma el nombre de madera madura y sus características son opuestas a las encontradas en madera juvenil; por la dificultad para determinarla se incluye en su definición a una zona intermedia, de transición entre juvenil y madura.

En la medida que la edad de explotación crece, el contenido de madera juvenil se atenúa porcentualmente. En general, se acepta que esta madera tiene características negativas pero, en determinados casos, puede tener ventajas, dependiendo del producto final deseado (Kellison, 1986) (Uprichard, 1973, 1980).

Por último, se muestra una importante influencia de la ubicación geográfica del sitio de crecimiento sobre las características de las fibras, y de la madera, estableciéndose que la madera producto de distintas regiones tiene un potencial diferente para la fabricación de papel (Cown, 1980).

Correlacionando las características morfológicas de las fibras con las propiedades del papel, en forma independiente se ha logrado establecer ecuaciones de regresión en concordancia con algunas informaciones publicadas (Matolcsy, 1975). Otros estudios biométricos muestran la influencia de la longitud de fibra sobre la resistencia al rasgado (Horn, 1974), pero también, deberá haber participación del espesor de la pared (Barefoot, 1964), que puede determinarse, indirectamente, a través del "coarseness" (Clark, 1962) (Fuentalba, 1982). También se puede apreciar la influencia de este factor a través de su efecto sobre la densidad de la madera que muestra una relación significativa con las propiedades del papel (Barefoot, 1966) (González, 1982).

Los estudios básicos analizados demuestran la variabilidad de las propiedades biométricas de las fibras, situación que pesa más que la que se presenta en las características químicas, cuando se trata de la fabricación de papel.

La extensión de las plantaciones de pino insigne en nuestro país, en un área que presenta variaciones de latitud, clima, altura, determina, sin duda, diferentes grados de influencia sobre la naturaleza de la madera y sus fibras. Como el asunto está estrechamente ligado a la estructura del abastecimiento de esta materia prima a las fábricas de celulosa y ésta debe cumplir especificaciones cada vez más exigentes en los mercados, se hace imperioso el conocimiento de las características del material en función de su procedencia, condiciones de crecimiento, etc., para programar la alimen-

tación de las plantas productoras tendiendo a la optimización de la calidad del producto final.

3. PARTE EXPERIMENTAL

El material colectado para el estudio de la variación que experimentan las propiedades de las fibras se recogió en función de su procedencia geográfica, edad, clase diamétrica y posición fustal.

El área de plantaciones considerada se ubicó entre los 34° y 39° de latitud sur; las edades correspondieron a raleo comercial (10 años) y tala rasa (20 años); se incluyó la variable clase diamétrica, como representativa de la velocidad de crecimiento y la posición fustal que determina la variabilidad dependiendo de la ubicación en diámetro y altura.

El material recogido se calificó en cuanto a características físicas y macroestructurales. A continuación, se sometió a cocción kraft y se evaluaron las características microestructurales de las fibras en conjunto con las propiedades mecánicas de las pulpas.

De acuerdo a lo anterior el área considerada se dividió en zonas geográficas caracterizadas, aproximadamente, por la productividad de las plantaciones, el tipo de suelo y la tributación a plantas de celulosa existentes y probables. Las denominaciones dadas a las zonas seleccionadas fueron sólo figurativas y no, necesariamente, coinciden con los lugares cuyos nombres se utilizan y correspondieron a:

1. Zona Pichilemu
2. Zona Vichuquen
3. Zona Constitución
4. Zona Cobquecura
5. Zona Concepción
6. Zona Arenales
7. Zona Los Sauces
8. Zona Arauco

Los rodales muestrados en cada zona están sometidos a manejo similar y corresponden al Índice de Sitio más representativo del sector seleccionado. En cada uno de ellos se recogió una muestra constituida por 5 árboles por clase diamétrica que, a su vez, se subdividieron en altura, extrayendo material cada 2,40 m hasta un IU de 10 cm. En la edad 10 años sólo se incluyó árboles de clase diamétrica media.

El material extraído en forma de rodela se utilizó en los análisis macroestructurales (rodela DAP) y en las determinaciones de densidad. Trozas de 50 cm de largo, extraídas simultáneamente, se astillaron y formaron conjuntos que, convenientemente agrupados, se sometieron a cocción kraft y determinación de características biométricas de las fibras y propiedades de las pulpas. Los distintos grupos formados se compararon entre zonas, edades y clases diamétricas.

La variación diametral se efectuó con material en forma de rodela en las que se separó el sector central, correspondiente a los primeros 10 anillos de crecimiento (madera juvenil), de la zona anular externa (madera madura). Ambos grupos se procesaron con el método kraft, comparando las características biométricas de las fibras y las propiedades de las pulpas.

En todos los casos se buscó la producción de pulpas con I. Kappa igual a 30 ± 2 , las que se refinaron en PFI hasta 4000 revoluciones para evaluar sus propiedades mecánicas.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

La observación del ancho de los anillos de crecimiento en la rodela DAP de ambas edades, indica que hay un comportamiento mejorando en crecimiento diametral a medida que se avanza de norte a sur, con

la sola excepción de la zona Arenales, en que el ancho de los anillos es de magnitud similar al encontrado en zonas ubicadas más al norte; sin embargo, no se observa la misma distribución en la altura total de los árboles.

Los valores de densidad verde se ordenan en proporción inversa con el DAP, esto es, con el ancho promedio de los anillos anuales. La misma relación se observa respecto de la proporción de madera de primavera (medida como porcentaje del ancho del anillo de crecimiento).

Tabla N° 1. Correlaciones Densidad verde (kg/m^3) vs. Altura fuste (m)
20 años - Clase diamétrica media

Zona	Correlación	R ²
Constitución	$0,420-0,593 \times 10^{-2}H + 1,544 \times 10^{-4}H^2$	93
Cobquecura	$0,435-0,431 \times 10^{-2}H + 0,088 \times 10^{-4}H^2$	89
Concepción	$0,416-0,189 \times 10^{-3}H + 1,263 \times 10^{-4}H^2$	95
Arenales	$0,414-0,529 \times 10^{-2}H + 1,065 \times 10^{-4}H^2$	98
Los Sauces	$0,425-0,456 \times 10^{-2}H + 0,418 \times 10^{-4}H^2$	97
Arauco	$0,423-0,754 \times 10^{-2}H + 1,511 \times 10^{-4}H^2$	95

Los valores de densidad verde determinados en función de la altura del árbol confirman el patrón típico de ordenación, disminuyendo en la medida que la altura aumenta. La Tabla N° 1 resume las correlaciones encontradas para la edad 20 años, clases diamétrica media. La densidad media, como promedio ponderado

en volumen, muestra una tendencia a disminuir al avanzar de norte a sur, en la edad 10 años; no se presenta la misma situación en la edad 20 años, en que se aprecia que el margen de variación entre zonas es estrecha. (Tabla N° 2).

Tabla N° 2. Valores promedio de densidad verde (kg/m^3)

Zona	10 años Ø medio	Ø inferior	20 años Ø medio	Ø superior
Pichilemu	376			
Vichuquén	364			
Constitución	428	391	389	256
Cobquecura	383	407	399	381
Concepción	319	418	401	386
Arenales	343	388	379	359
Los Sauces	348	395	392	389
Arauco	329	384	373	361

Se observa también que la densidad varía en proporción directa con la edad, al aumentar la influencia que ejerce en este aspecto la madera madura. El efecto del aumento de la proporción de madera de verano,

cuando el ancho del anillo anual decrece, se comprueba con el mayor valor que alcanza la densidad en la clase diamétrica inferior.

Tabla N° 3. Propiedades de las fibras y de las pulpas. Comparación entre edades, sitios y clases diamétricas.

Sitio	Edad (años)	Clase diamét.	Ancho fibra (μ)	Long. fibra (mm)	Coarseness (mg/100 m)	Drenaje ("SR) (PFI 4000 r)	L.R. (km)	F.R. (-)
Pichilemu	10	Media	58,2	2,48	19,0	16	9,32	136
	10	Media	56,3	2,31	20,6	16	10,13	102
Vichuquén	10	Media	41,5	2,19	18,5	17	9,04	134
	10	Inf.	55,9	2,31	18,9	16	9,57	128
Constitución	20	Media	55,4	2,47	18,3	15	9,92	119
	20	Sup.	61,0	2,49	17,4	17	10,41	110
Cobquecura	10	Media	49,6	2,14	20,0	17	9,74	132
	20	Inf.	54,9	2,49	21,2	17	10,56	127
	20	Media	41,0	2,51	21,1	17	9,89	132
	20	Sup.	60,3	2,72	24,7	17	9,66	131
Concepción	10	Media	46,7	2,11	17,9	18	9,26	120
	20	Inf.	58,2	2,53	22,7	15	8,71	140
	20	Media	42,9	2,60	21,1	16	9,56	147
	20	Sup.	58,9	2,68	20,9	17	9,91	125
Arenales	10	Media	47,0	1,96	16,8	17	9,70	103
	20	Inf.	55,5	2,55	17,6	15	10,22	124
	20	Media	57,1	2,46	20,9	17	10,13	122
	20	Sup.	59,5	2,55	18,2	17	9,84	123
Los Sauces	10	Media	43,9	2,15	19,5	17	9,62	120
	20	Inf.	55,6	2,57	18,5	18	10,17	124
	20	Media	50,3	2,59	20,5	17	9,95	117
	20	Sup.	57,4	2,69	19,6	17	9,31	131
Arauco	10	Media	48,3	2,12	17,6	17	10,49	113
	20	Inf.	55,3	2,43	18,3	18	10,67	107
	20	Media	47,1	2,47	20,9	16	10,24	122
	20	Sup.	58,4	2,55	17,1	18	9,80	107

La Tabla N° 3 muestra los resultados de la evaluación de las pulpas y las características biométricas de las fibras del conjunto de cada clase diamétrica, en cada edad y zona.

El ancho de las fibras oscila entre 40 y 60μm sin observarse alguna ordenación respecto de la procedencia de la madera ni respecto de la edad. En 20 años hay una tendencia a aumentar el ancho de las fibras en la clase diamétrica superior.

La longitud de las fibras es más baja en 10 años que en 20 años, debido al aumento que experimenta la longitud desde médula a corteza. En 10 años se aprecian valores más altos en las zonas Pichilemu y Vichuquén, haciéndose más baja y pareja la longitud hacia el sur. El recorrido global corresponde a 1,96 - 2,48 mm. En 20 años se observa una clara tendencia a mostrar valores más altos en la clase diamétrica superior, anotándose los siguientes márgenes en orden creciente de clase diamétrica: 2,31 - 2,57; 2 - 46 - 2,60 y 2,49 - 2,72 mm.

El coarseness presenta un recorrido de 16,8 - 20,6 (mg/100 m) en la edad 10 años y, en general, los valores son inferiores a los encontrados en 20 años, aunque son comparables con los correspondientes de la clase diamétrica superior en esta edad. En 20 años la tendencia es clara con una variación inversa con respecto a la clase diamétrica. En esta forma, la variación se asimila a la que se encontró para la densidad verde de la madera, aunque con algunas distorsiones que pueden explicarse por el ancho de las fibras y por las modificaciones producidas por la cocción. Los valores más altos

se encuentran para la clase diamétrica inferior, fluctuando entre 17,6 y 22,7 (mg/100 m). En ninguno de los casos se aprecia alguna ordenación o tendencia en relación con la procedencia del material.

En 10 años, la zona 3 (Constitución) muestra el valor más bajo en la longitud de ruptura, asociado con un valor mayor de densidad de la madera; el rasgado es alto, similar al de la zona 4 (Cobquecura), cuyo valor de densidad es el segundo de la serie. La Zona 1 (Pichilemu) tiene el rasgado mayor, con densidad un poco inferior pero con longitud de fibra superior al resto. La pulpa correspondiente a la zona 2 (Vichuquén) tiene un comportamiento anormal, ya que presenta características de resistencia mecánica que se apartan de la tendencia típica en relación con las características de las fibras. La zona 6 (Arenales) muestra el valor mínimo de rasgado asociado con su menor longitud de fibra. En el global de la edad, el margen de variación de los valores de longitud de ruptura (9,0 - 10,5 km) es aceptable y no presenta ordenación respecto de la ubicación geográfica Norte-Sur. La resistencia al rasgado, también dependiente de las propiedades de las fibras, alcanza valores más bajos, para el grado de refinación, al cual se midió, en algunas zonas y muy buenos en otras, con un margen global de 102-136.

El recorrido de los valores de la longitud de ruptura en 20 años es de 8,7 - 10,7 km, muy similar al observado en 10 años, lo que hace concluir que, en este aspecto, la madera generada en los primeros años influye mucho. No es el caso del rasgado, donde se aprecian

modific
ra gene
ordena
al rasg
pesor
sufre a
de la cl
varian
las cla
107-140
mite de

T

S

M

C

C

A

L

A

M

C

C

C

A

L

A

La
La ma
mader
mient
lulosa
dera j
indica
obser
situac
crec
za.

C
cuent
juven
fibra
35%;
un re

E
pedar
longit
recor
ra m:

modificaciones del comportamiento en base a la madera generada después de los 10 años, y no se mantiene la ordenación vista en longitud de ruptura; la resistencia al rasgado, donde se acepta la influencia directa del espesor de pared (o densidad) y la longitud de fibra, sufre alteraciones en la tendencia esperada respecto de la clase diamétrica cuando estas dos características varían en forma opuesta: los márgenes de variación en las clases diamétrica, inferior, media y superior son 107-140; 117-147 y 107-131, respectivamente, lo que permite deducir que en la clase diamétrica media se con-

jugan y balancean ambos factores.

En un análisis más específico destaca la zona 5 (Concepción), en las clases diamétricas inferior y media, con valores de rasgado más altos asociados a valores de longitud de ruptura más bajos, de acuerdo con las densidades de la madera mayores y longitudes de fibra altas. En cambio, la zona 8 (Arauco) tiene valores más bajos de rasgado en las clases diamétricas inferior y superior, asociados con valores bajos de densidad y de longitud de fibra: consecuentemente, las longitudes de ruptura están en el margen alto.

Tabla N° 4. Propiedades de las fibras y las pulpas. Comparación entre madera juvenil y madura. 20 años — clase diamétrica media.

Sitio	Ancho fibra (μm)	Long. fibra (mm)	Coarseness (mg/100 m)	°SR (PFI 4000 r)	L.R. (km)	F.R. (-)
Madera juvenil						
Constitución	56,0	2,63	16,5	17	10,57	117
Cobquecura	48,2	2,84	17,7	17	11,06	116
Concepción	46,6	2,55	20,4	17	9,64	142
Arenales	49,9	2,58	16,9	17	10,48	128
Los Sauces	46,8	2,86	19,2	16	10,55	107
Arauco	57,3	2,48	19,6	17	11,05	109
Madera madura						
Constitución	48,8	3,12	25,2	15	8,78	170
Cobquecura	44,1	3,56	24,4	15	8,28	202
Concepción	43,8	3,12	24,0	15	8,48	189
Arenales	46,1	3,19	25,7	15	8,64	189
Los Sauces	42,1	2,86	23,9	15	10,11	167
Arauco	42,8	2,92	22,8	16	9,71	140

La Tabla N° 4 muestra los resultados del ensayo. La madera madura tiene notables diferencias con la madera juvenil que justifican el diferente comportamiento en términos de las propiedades finales de la celulosa. Así, se encuentra mayor ancho de fibra en madera juvenil asociado con un menor coarseness, lo que indica menor espesor de pared y, por ende, la menor densidad, típica de esta parte del fuste. También, se observa mayor longitud de fibra en la madera madura, situación reconocida de acuerdo a la variación normal creciente de la longitud de fibra desde médula a corteza.

Como promedio de todas las zonas en estudio se encuentra: un mayor ancho de fibra de 14% en madera juvenil, con recorrido de 6-34%; una mayor longitud de fibra de 21% en madera madura, con recorrido de 11-35%; un mayor coarseness de 34% en madera madura, un recorrido de 16-53%.

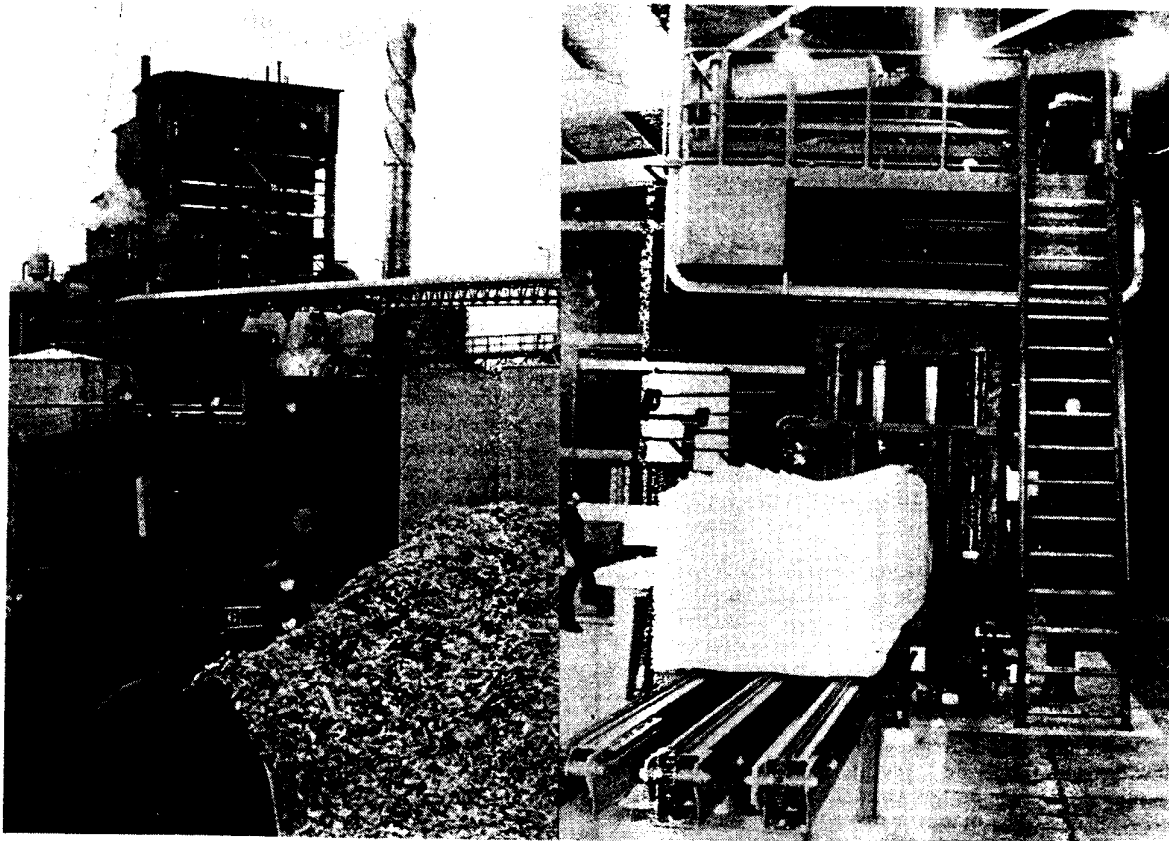
Estas diferencias producen variaciones en las propiedades mecánicas de la pulpa, según: una mayor longitud de ruptura de 18% en madera juvenil, con un recorrido de 4-34%, un mayor rasgado de 47% en madera madura, con recorrido de 29-74%.

5. CONCLUSIONES

- La densidad de la madera depende de la posición en altura en el fuste; a medida que aumenta la altura la densidad disminuye.
- La densidad de la madera y las características biométricas de las fibras (longitud y coarseness) aumentan con la edad del árbol.
- La densidad de la madera varía en función inversa con respecto al diámetro del fuste.
- La longitud de fibra tiende a aumentar en proporción directa con respecto al diámetro del fuste.
- El coarseness de las fibras varía en proporción inversa con el diámetro del fuste.
- El Factor de rasgado aumenta con la edad del árbol lo que implica un aumento de la longitud de fibra y el coarseness.
- Las pulpas de 10 años alcanzan valores de longitud de ruptura similares a las pulpas de 20 años.
- La madera juvenil presenta menor densidad, menor coarseness, menor longitud y mayor ancho de fibra, comparada con la madera madura.
- La madera juvenil presenta mayor longitud de ruptura y menor Factor de rasgado que la madera madura en concordancia con la variación de las características biométricas.

BIBLIOGRAFIA

- Asenjo, P. y Paz, J. Rev. Chilena Ing. N° 1, 21-24 (1962).
- Barefoot, A.C. et al. Tappi 49 (4), 137 (1966).
Tappi 47 (6), 351 (1964).
- Bluhm, E. y Melo, R. et al. Inst. For. Latinoam. Boletín 13, 3-12 (1963).
- Cown, D.J. New Zealand Journal of Forestry Science, 19, 1, 85 (1974).
- Cown, D.J. and Kiblewhite, R.P. New Zealand Journal of Forestry Science, 10, 3, 531 (1980).
- Fuentealba, J.C. y Melo, R. Variabilidad del espesor de pared en traqueidas estimado a través del peso por unidad de longitud. Comunicación. 5ª Reunión sobre Investigaciones y Desarrollo Industrial en Productos Forestales, 27-29 octubre, U. de Chile, Stgo. (1982).
- González, J. y Vargas, M. Características de las fibras y su influencia en la calidad del papel. 5ª Reunión sobre Investigaciones y Desarrollo Industrial en Productos Forestales, 27-29 octubre, U. de Chile, Stgo. (1982).
- Harris, J.J. N.Z. For. Tech. Pap. (1965).
- Hielt, L.A. et al. Tappi 43, 2 (1960).
- Horn, R.R. USDA For. Service FPL 242 (1974).
- Kellison, R.C. and Hitchings, R.G. Pulp & Paper 53 (May, 1986).
- Matolczy, G.A. Tappi 58, 4, 136 (1975).
- Paz, J. y Ceballos, M.E. Propiedades fundamentales del P. radiata. Informe final, CIC N° 2, U. de C. (1966).
- Uprichard, J.M. Hozforschung 25, 4, 101 (1971).
Appita 27, 3, 179 (1973).
- N.Z. Jor. For. Sci. 10, 3, 561 (1980).
- Watson, A.J. and Dadswell, Appita 14, 5 (1961).
Appita 15, 6 (1962).



S

P
d
qE
bl
qu
se

L

el
qu
reci
de
Pi
su
m.
pr

ci

—

—

—

lle
rox
sul

—

—

—