

Influencia de la edad de corte en el pulpeo de *Eucalyptus globulus* plantado en Uruguay

Resquin Fernando¹, Fariña Ismael², Rachid Cecilia¹, Rava Agustín², Doldán Javier²

¹Programa de Producción Forestal, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Tacuarembó. Ruta 5 km 386, Tacuarembó 45000, Uruguay. Correo electrónico: nando@inia.org.uy

²Departamento de Proyectos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Avenida Italia 6201, 11500 Montevideo, Uruguay.

Recibido: 5/10/11 Aceptado: 2/7/12

Resumen

Se evaluaron dos materiales genéticos de *E. globulus* (Jeeralang y Chivilingo) en las zonas litoral y sureste del Uruguay, cada uno con dos turnos de cosecha. En cada turno se evaluó el crecimiento, la productividad de celulosa y las propiedades de las fibras. Las edades de cosecha variaron de 6,6 años a 10,7 años y el período entre evaluaciones fue de aproximadamente dos años. En general se obtiene una mejora en las propiedades pulpables, en la eficiencia productiva de convertir madera en celulosa y de las propiedades de las fibras al aumentar la edad de cosecha.

Palabras clave: *E. globulus*, edad de cosecha, pulpeo, fibra

Summary

Influence of Harvest Age on Kraft Pulp Production for *Eucalyptus globulus* planted in Uruguay

Genetic materials of two *E. globulus* provenances (Jeeralang and Chivilingo) grown in western litoral and southeastern areas in Uruguay, with two shifts each harvest were evaluated. For each shift growth, cellulose productivity, and properties of cellulose fibers were evaluated. Age at harvest ranged from 6.6 to 10.7 years, and the period between assessments was approximately two years. In general results indicate an improvement in pulping properties, in the productive efficiency of transforming wood into pulp, and in fiber properties, with an increasing age of harvest.

Key words *E. globulus*, harvesting age, pulping, fibers

Introducción

E. globulus es una especie que ha presentado serios problemas sanitarios y por tanto se ha reducido en forma notoria su área de plantación en los últimos años. Esto ha sido más evidente en la zona litoral, motivo por el cual se ha ido substituyendo en forma progresiva por especies como *E. grandis* y *E. dunnii*.

Resultados de varios estudios realizados desde este punto de vista indican que a medida que se incrementa la edad de los árboles, en términos generales, se obtienen

mejores resultados en el proceso de pulpeo y el tipo de celulosa y papel obtenido. En este sentido, se ha determinado que dentro de ciertos rangos de edad, se produce un aumento de la densidad y el rendimiento, y una disminución de algunos parámetros de la composición química que deben ser removidos durante el pulpeo químico.

En función de esto, resulta de interés determinar el mejor momento de cosecha teniendo en cuenta que de acuerdo a la información existente las propiedades pulpables de la madera tienen un cambio importante con un incremento del turno de corta.

Materiales y métodos

La estrategia de este proyecto consiste en la evaluación de dos materiales genéticos: Jeeralang (Australia, 38° 24' sur; 146° 3' oeste) y Chivilingo (Huerto Semillero de Forestal Monteáguila/Chile 37° 00' sur, 71° 29' oeste) a lo largo del ciclo del cultivo en las zonas litoral y sureste. Las evaluaciones está previsto continuarlas durante los años 2012 y 2014.

Características de las parcelas

En el Cuadro 1 se describen las principales características evaluadas. Las parcelas están instaladas en predios de empresas comerciales y fueron seleccionadas porque se consideraron representativas desde el punto de vista del crecimiento de acuerdo al inventario de cada empresa.

Muestreo de árboles

Cada dos años (a partir de las edades que se describen en el Cuadro 1) se midió el DAP de todos los árboles y la altura total de aproximadamente 1/3 de los mismos. Con esos datos se estimaron las alturas del resto de los árboles de la parcela y la sobrevivencia. El volumen individual y por hectárea hasta un diámetro con corteza de 6 cm fue estima-

do a través de ecuaciones de volumen ajustadas a partir de los datos de los árboles muestreados. Fueron utilizadas las ecuaciones de volumen citadas por Crechi *et al.* (2006) (Cuadro2).

Con estos valores se estimó la sobrevivencia, el volumen por árbol y por hectárea y el incremento medio anual (IMA).

A partir de los valores de DAP se determinó el área basal (AB). Con los valores de DAP se establecieron clases, cada una con una amplitud de 3 cm. Para el muestreo fueron consideradas solo las que representan la mayor parte del AB total de la parcela (aproximadamente 85% del total). Para el muestreo de árboles no fueron considerados los individuos de menor DAP relativo. De cada una de estas cinco clases se seleccionaron los 20 árboles con DAP más próximo a la media de cada clase para medirlos con pilodyn. De esos 100 árboles se seleccionaron y apearon 15 que tuvieran valores altos, medios y bajos de penetración del pilodyn (dentro del rango obtenido en cada parcela) y cuyo promedio estuviera próximo a la media de los 100 árboles. La cantidad de árboles apeados dentro de los grupos de valores alto, medio y bajo de penetración de pilodyn estuvo en proporción del AB que cada una de las clases representan en el total de AB de la parcela.

Cuadro 1. Principales características de las parcelas en evaluación.

	Jeeralang		Chivilingo	
	Litoral	Sureste	Litoral	Sureste
Localización				
Latitud	33° 20' 19,38"S	33° 48' 05,92"S	33° 20' 38,26"S	34° 10' 24,99"S
Longitud	57° 48' 20,23"O	54° 56' 00,53"O	57° 51' 31,92"O	54° 17' 30,99"O
Distancia plantación	3,3 x 2,1	3,8 x 1,9	4 x 2,6	3,7 x 1,8
Árboles/ha iniciales	1364	1415	960	1664
Área evaluada (ha)	1,1	0,97	1,3	0,9
Árboles muestreados	15	15	15	15
Grupo CONEAT	9,1	2,12	9,3	2,12
Clasificación de suelo*	Argiudolls y Hapludetts	Argiudolls	Argiudolls y Hapludetts	Argiudolls, Hapludolls y Hapludalfs
Edad (años)	8,6 10,7	7,6 9,8	6,9 9,1	6,6 8,7
Laboreo	Subsolado agrícola + dos excéntricas	Subsolado D8+excéntrica+disquera	Subsolado agrícola + dos excéntricas	Excéntrica+ Subsolado D6 + excéntricas+ disquera
Fertilización	80 g 15/40/0		80 g 15/40/0	80 g 7/40/40/0

*Fuente: Duran, *et al.*, 1999.

Cuadro 2. Ecuaciones de volumen utilizadas en cada muestreo.

Sitio	Edad	Modelo	Función
Chivilingo litoral	6,9	Naslund	Volumen=0,321-0,0003771DAP ² -0,00000615DAP ² *H+0,00011015DAPH ² -0,00195H ²
Jeeralang Litoral	8,6	Schumacher-Hall	LN Volumen = -7,04256+2,58361LNDAP-0,68834 LNH
Jeeralang sureste	7,6	Schumacher-Hall	LN Volumen = -11,11994+1,80129LNDAP+1,41272 LNH
Chivilingo Sureste	6,6	Schumacher-Hall	LN Volumen= -10,7624+1,97601LNDAP+1,12332 LNH
Chivilingo litoral	9,1	Schumacher-Hall	LN Volumen = -9,82226+1,86401LNDAP+0,92478 LNH
Jeeralang Litoral	10,7	Meyer	Volumen = 0,22303-0,04036DAP+0,00144DAP ² +0,00049869H ²
Jeeralang sureste	9,8	Schumacher-Hall	LN Volumen = -10,24458+1,85247LNDAP+1,08074LNH
Chivilingo Sureste	8,7	Naslund	Volumen =-0,12404-0,00028134DAP ² -0,00000231DAP ² *H+0,00002188DAPH ² +0,00014108H ²

A las alturas del DAP, 50 y 75% de la altura comercial fueron extraídos discos de aproximadamente 3 cm de espesor para determinar la densidad básica. A partir de 1,3 m fue extraída una troza de 1 m de largo para los análisis de pulpeo.

Análisis de laboratorio

De los discos extraídos al DAP, 50% y 75% de la altura comercial, se elaboraron probetas para la determinación de densidad aparente básica (Dab) y longitud de fibra. De cada disco se tomaron tres probetas en el radio (médula-corteza) que presentaran leño con características normales (sin madera de reacción). La nomenclatura usada fue A, B y C, ubicando la probeta A en la zona cercana a la médula, la B en la zona intermedia y la C contra la corteza. El procedimiento se realizó para cada disco en las tres alturas estudiadas; resultando en nueve probetas por árbol.

La densidad aparente básica fue determinada según Technical Association of the Pulp and Paper Industry (2006).

Para la medición de la longitud de fibra las muestras fueron tomadas de las probetas A, B y C para las tres alturas. Se realizó un macerado colocando cada muestra en un recipiente con una solución de ácido acético y peróxido de hidrógeno (relación 1:1 en volumen) en estufa a 60 °C durante 48 horas. Posteriormente las fibras maceradas fueron enjuagadas con agua. La longitud de fibras se midió mediante software de adquisición de imágenes adjunto a un microscopio Nikon Eclipse E800. En cada muestreo fueron medidas aproximadamente 32.400 fibras, provenientes

en cada caso de 60 árboles x 60 fibras/á x 3 alturas x 3 posiciones.

Análisis de pulpeo, blanqueo y propiedades papeleras

Para el chipeo y tamizado las trozas fueron procesadas en una chipera de disco vertical marca KUMAGAI. Los chips obtenidos de las 15 trozas de cada parcela fueron mezclados para lograr una muestra homogénea y representativa mediante el método de cuarteos. Posteriormente se realizó un tamizado entre bandejas de orificios de 10 mm y 29 mm de diámetro con el cometido de descartar finos y sobre-tamaños. Mediante una clasificación visual se extrajeron los chips con nudos y otros defectos.

Con los chips seleccionados se condujeron los ensayos de pulpeo kraft en un digestor rotativo con cuatro cápsulas, cada una para un contenido de 200 g de chips secos. Las condiciones de cocción, tratando de obtener un Índice Kappa de 20 ± 1 , fueron las siguientes: Temperatura máxima (°C) 165, Sulfidez (%) 25, Tiempo hasta temp. Máxima (min) 90, Tiempo a la máx. Temp. (min) 50, Relación licor/madera 3,5/1, Alcali Activo (AA) (porcentaje como Na₂O) variable.

Una vez obtenidas las pulpas se determinó: Rendimiento bruto (Rb), Rendimiento depurado (Rd), Índice Kappa (Norma TAPPI T-236om 06) (TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2006).

Con el valor de densidad y rendimiento pulpable fue estimado el consumo específico de madera (CE). Con estos valores se estimó el tenor de sólidos secos (tss) generados

Cuadro 3. Principales características de las etapas de blanqueo.

	Etapa ácida	Dióxido de cloro	Extracción con peróxido	Dióxido de cloro	Peróxido
	A	D1	Ep	D2	P
Pulpa (c%)	10	10	10	10	10
T (°C)	95	85	85	80 a 85	85
Tiempo (min)	110	10	60	180	120
H ₂ SO ₄ (kg/ADt)	10				
NaOH (kg/ADt)			7,5		1,5
Fkappa		0,21		0,21	
Kappa inlet.		8,3		2,4	
ClO ₂ (kg/ADt)		15,6		4,4	
H ₂ O ₂ (kg/ADt)			4,5		3,6
pH final	3,5	2	9 a 10	4 a 4,5	>10
MgSO ₄ .7H ₂ O (kg/ADt)					1

por tonelada de celulosa producida a través de la siguiente fórmula: $tss = ((100 - Rb) + AA)/Rd$

Donde:

tss = tenor de sólidos secos - tss/odt;

Rb = rendimiento bruto - %

AA = álcali ativo aplicado - %

Rd = rendimiento depurado - %

Con el valor de volumen por hectárea, densidad básica y rendimiento bruto fueron estimados los valores de producción de celulosa por hectárea.

Con la pulpa obtenida en las cocciones se realizó la delignificación con oxígeno prosiguiendo con una secuencia de blanqueo ECF (Elemental Chlorine Free) con las etapas listadas a continuación y detalladas en el Cuadro 3.

Para refinar la pulpa se utilizó un molino PFI según el procedimiento LATU basado en la norma ISO 5264 (ISO, 2002). Se utilizaron tres intensidades de refinado: 0, 1000 y 3500 revoluciones. Posteriormente se determinó para cada intensidad los índices de drenabilidad (CSF y SR°).

Para la formación de las hojas manuales se utilizó el procedimiento LATU basado en la norma ISO 5269 (ISO, 2005).

Se determinaron las siguientes propiedades: gramaje, resistencia a la tracción resistencia al desgarrar según la ISO (1998).

Para comparar los resultados de resistencia de las hojas se utilizó un indicador determinado por el producto del Índice de tracción (*tensile Index*, Nm/g) y el Índice de desgarrar (*tear Index*, mNm²/g).

Con los datos de DAP, altura comercial, densidad básica y longitud de fibra se realizó un análisis de varianza comparando en cada una de las parcelas la primera vs la segunda evaluación mediante la prueba F en SAS/STAT.

Resultados y discusión

Crecimiento

De los datos de crecimiento se observa que ocurre un incremento significativo (en un plazo aproximado de dos años) de los valores de DAP (Diámetro a la Altura del Pecho) y altura comercial en todas las parcelas evaluadas excepto para la altura de Jeeralang en litoral (Cuadro 4). No obstante esto los incrementos son relativamente reducidos salvo para el caso de Chivilingo en la zona sureste. En este caso ocurrió un aumento de 1,5 cm en el DAP y 2,2 m en la altura comercial en un período de 25 meses.

Esto podría ser explicado por la mejor adaptación de esta especie, como ya es conocido, a las regiones más próximas a la influencia marítima (Resquin y Balmelli, 2005; Balmelli, 2002). Estos pequeños incrementos individuales en el crecimiento determinaron que los incrementos de volumen hayan permanecido prácticamente constantes en relación a la medición anterior. Sin embargo, estos crecimientos son relativamente altos para esta especie teniendo en cuenta los importantes problemas sanitarios que la misma ha tenido en los últimos años. Cabe destacar que, los principales agentes patógenos que afectan esta especie

Cuadro 4. Valores de crecimiento de las parcelas evaluadas.

	ORÍGENES							
	Jeeralang				Chivilingo			
	Litoral		Sureste		Litoral		Sureste	
Edad (años)	8,6	10,7	7,6	9,8	6,9	9,1	6,6	8,7
Árbol/ha	1013	1013	1217	1190	644	622	1177	1156
DAP (cm)	18,2 a	19 b	16,3 a	17,2 b	19,3 a	20 b	16,6 a	18,1 b
Altura (m)	22,2 a	22,4 a	19 a	20,2 b	17,5 a	19 b	19,2 a	21,4 b
Vol /árbol (m ³)	0,203 a	0,266 b	0,160 a	0,198 b	0,218 a	0,242 b	0,171 a	0,241 b
Vol /ha (m ³)	228	258	190	223	139	148	181	254
IMA (m ³ /ha/año)	25	24,1	25	23,3	20,1	16,1	30,5	29
Corteza (%)	17,8	19,2	16,6	17,2	16,7	17	16,3	13,9
Sobrevivencia (%)	74	74	86	84	67	65	71	69

tienen su mayor incidencia cuando el árbol está en sus etapas juveniles, que no es la situación de las parcelas que están siendo evaluadas en este caso (Simeto *et al.*, 2009).

Del análisis de los resultados se obtiene que los mayores y menores incrementos relativos se observan con Chivilingo en las zonas sureste y litoral respectivamente, indicando que Jeeralang tendría un comportamiento más "estable" en las dos zonas (Figuras 1 y 2).

En todos los casos los valores de sobrevivencia se han mantenido casi sin cambios y relativamente altos en el período de evaluación, a pesar de la ocurrencia de algunos síntomas de podredumbre en la troza basal y canchros a lo largo del fuste.

Propiedades pulpables

El análisis estadístico de los datos de la densidad básica muestra que no existen diferencias entre las dos edades en

las parcelas evaluadas a excepción de la parcela de Chivilingo en la zona sureste (Cuadro 5 y Figura 3). Esto indica que no ocurren cambios en esta variable con los aumentos en amplitud de los turnos de cosecha analizados salvo en el sitio mencionado. Esto coincide con lo obtenido por Foelkel (1978), en el sentido de que las maderas con estas edades (7 a 11 años) se encuentran en un proceso de transición de "juveniles" a "adultas", período en el cual no ocurrirían grandes cambios. Al mismo tiempo, hay que considerar el hecho de que dos años es un periodo relativamente corto para el ciclo de algunas especies de eucaliptos. No obstante, existe un gran número de trabajos con *E. globulus* y otras especies que muestran que la densidad de la madera aumenta con la edad con turnos similares a los evaluados en este caso (Vital *et al.*, 1984; Colodette *et al.*, 2008; Melo *et al.*, 1991). Resultados similares han sido reportados con *E. saligna* (Trugilho *et al.*, 1996); *E. grandis* x *E. urophylla*

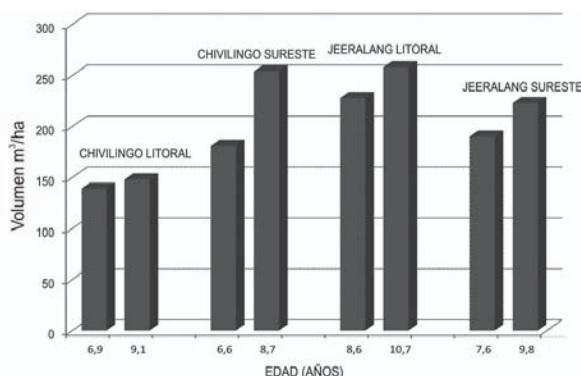


Figura 1. Volumen acumulado de ambas fuentes de semilla en los sitios y edades evaluadas.

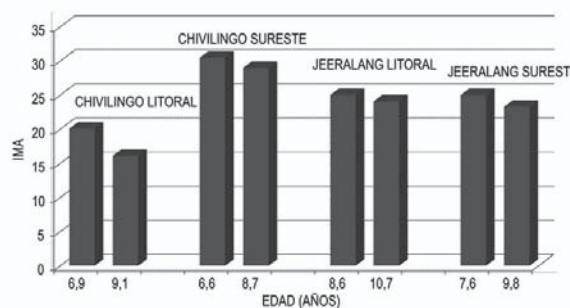
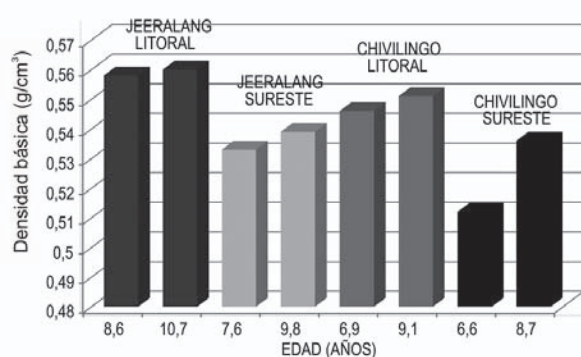


Figura 2. Incremento medio anual del volumen (m³/ha) de ambas fuentes de semilla en los sitios y edades evaluadas.

Cuadro 5. Valores de resultados del pulpeo y productividad de celulosa por ha.

	ORÍGENES							
	Jeeralang				Chivilingo			
	Litoral		Sureste		Litoral		Sureste	
Edad (años)	8,6	10,7	7,6	9,8	6,9	9,1	6,6	8,7
Densidad básica (g/cm ³)	0,558	0,56	0,533	0,539	0,546	0,551	0,512	0,536
Alcali activo (%)	14,7	14,5	14,1	13,1	14,9	13,8	13,7	12,5
N ^o . Kappa	20	20	20	20	20	20	20	20
Rendimiento (%)	50,4	50,7	52,2	54,1	51	52,5	53	54,9
Consumo (m ³ /ton cel)	3,20	3,17	3,23	3,09	3,23	3,11	3,32	3,06
Prod. Cel (ton/ha)	64,1	73,3	52,8	65,0	38,7	42,7	49,1	74,7
Prod. Cel (ton/ha/año)	7,5	6,8	6,9	6,6	5,6	4,7	7,4	8,6
Tss/ton cel	1,28	1,26	1,18	1,09	1,25	1,17	1,15	1,05

**Figura 3.** Valores de densidad de la madera de las fuentes de semilla en los sitios y edades evaluadas.

(De Carvalho, 1997), *E. grandis*, *E. saligna*, *E. dunnii*, *E. maidenii* y *E. benthami* (Backman y García De León, 2003); *E. grandis*, (Damasceno, 2008; Rezende y Ferraz, 1985) y con varias especies de Eucaliptos (Ferreira *et al.*, 1978, 1979). De acuerdo a la literatura este incremento de la densidad está asociado a un aumento del espesor de la pared de las fibras. Esto es lo que podría estar ocurriendo con la parcela de Chivilingo en donde ocurre un aumento de casi 5% (0,536 vs 0,512 g/cm³) en el valor de densidad de la madera al aumentar la edad de cosecha. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos en evaluaciones anteriores en las que se observó que en la zona de litoral se obtienen valores de densidad básica más altos que en el resto del país, tanto con esta como con otras especies de eucaliptos (Resquin *et al.*, 2004).

Al mismo tiempo se observa un aumento en el rendimiento de celulosa que podría estar asociado a una mejora en la facilidad de remoción de algunos componentes como la lignina o los extractivos, aunque esto debería ser confirmado con otro tipo de evaluaciones. De acuerdo a la literatura no siempre se observa una clara relación entre la densidad de la madera y el resultado del pulpeo. En términos generales se acepta que a mayor densidad (con densidades de 400 a 600 kg/m³, aproximadamente) existe una mayor disponibilidad de madera para el proceso de pulpeo y por tanto, a igualdad de otros factores, se obtendría una mayor cantidad de celulosa. En los hechos se ha detectado que existe una serie de parámetros que inciden en el proceso de pulpeo como la permeabilidad de la pared celular, el contenido de pentosanos, la relación siringila/guaicila (S/G) y el contenido de extractivos (Foelkel *et al.*, 1992; Pereira *et al.*, 1994; Reina y Resquin, 2011).

En este caso, si bien no fue realizado un análisis estadístico de los datos de rendimiento pulpeable los resultados indicarían cierta independencia entre los valores de densidad básica y rendimiento. Si bien esto coincide con lo obtenido por Doldán (2007), Resquin *et al.* (2006), Colodette *et al.* (2008), Foelkel (1974), Barrichelo *et al.* (1983), Turner *et al.* (1983), Vasconcelos Dias y Silva Junior (1985), Goyal *et al.* (1999) y Santos (2000), también hay que tener en cuenta que el número de valores analizados es reducido.

Los incrementos de rendimiento pulpeable obtenidos, salvo para la parcela de Jeeralang en el litoral, son de 1,5 a 2 puntos porcentuales de rendimiento en un período aproximado de dos años (Figura 4). De acuerdo a algunos auto-

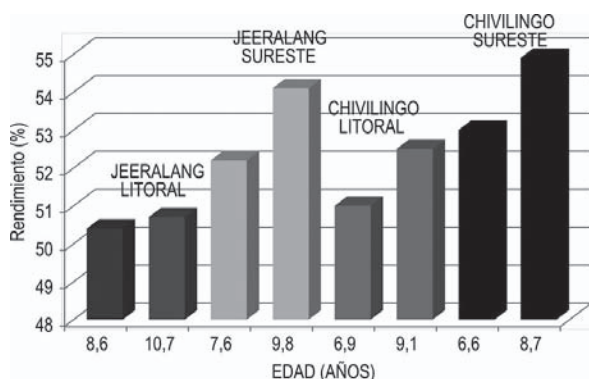


Figura 4. Valores de rendimiento en pasta de las fuentes de semilla en los sitios y edades evaluadas.

res el tenor de lignina tiende a disminuir con la edad debido a que las maderas con mayor proporción de madera juvenil poseen más lignina y menor contenido de celulosa que la madera madura (Vital *et al.*, 1984; Alencar, 2002; Colodette *et al.*, 2008; Trugilho *et al.*, 1996). Por otro lado, también se han reportado estudios con varias especies de eucaliptos en donde no se ha encontrado una relación definida entre la composición química y el rendimiento pulpeable (Resquin *et al.*, 2006; Reina y Resquin, 2011, Melo *et al.*, 1991).

En este estudio se observa que se alcanza el mismo grado de delignificación (Nro Kappa) con una menor concentración de álcali activo al aumentar la edad de corte. Esto estaría indicando una mayor facilidad en la remoción de la lignina, los extractivos o ambos. Con respecto a la lignina podría ocurrir una disminución en el contenido de la madera o un aumento de la reactividad de la misma determinada por la relación S/G como fue mencionado anteriormente. Es ampliamente conocido que el menor requerimiento de álcali activo determina un menor ataque a los carbohidratos y por tanto una mayor conservación de la celulosa y hemicelulosas presentes en la madera (Backman y García De León, 2003; Resquin *et al.*, 2004; Barrichelo, 2001; Gomes da Silva, 2001; Bassa, 2001; Broglio da Rosa *et al.*, 2002). Este aumento de los rendimientos y menor uso de reactivos podría generar una reducción de la cantidad de sólidos totales generados por tonelada de celulosa producida y al mismo tiempo una reducción de la carga química del sistema de recuperación del licor de cocimiento.

La disminución del valor del contenido de sólidos generados con el incremento de la edad de corte se observa en todas las parcelas evaluadas. Desde este punto de vista la parcela de Chivilingo en sureste es la que registra el menor valor (1,05 tss/ton cel) con una reducción de casi el 9% al

cambiar el turno de cosecha de 6,6 a 8,7 años. Los valores de sólidos en el licor de cocimiento son más bajos que los normalmente obtenidos a nivel de planta, el cual se aproxima a 1,5 tss/ton cel. Esto es debido a que por un lado en fábrica existe una mayor cantidad de inorgánicos provenientes del proceso de recuperación química (generación de carbonatos, sulfatos, etc.) (Bassa, 2002). Otra de las razones es que en condiciones de laboratorio los nudos no son ingresados a la cocción, lo cual provoca un menor rendimiento bruto y mayor rendimiento depurado que en condiciones de planta.

De todos modos, de acuerdo a este parámetro se observa que en todas las parcelas evaluadas ocurre una mejora en la eficiencia del proceso de pulpeo con el incremento de la edad de cosecha.

El aumento del rendimiento pulpeable con el incremento de la edad de corte determina en todos los casos una disminución del valor de consumo de madera con un máximo de 8,5% en la parcela de Chivilingo en la zona de sureste (Cuadro 5 y Figura 5).

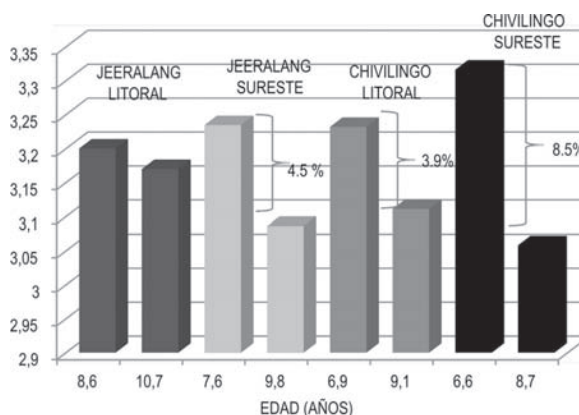


Figura 5. Valores de consumo de madera de las fuentes de semilla en los sitios y edades evaluadas.

Como resultado de los valores de crecimiento, densidad de la madera y rendimiento pulpeable, se observa en todos los casos un aumento en la producción de celulosa por hectárea. Esto es más notorio en la parcela de Chivilingo en sureste con un incremento de 50% (49,1 vs. 74,7 ton/ha) cambiando el momento de cosecha de 6,6 a 8,7 años, respectivamente. Los mayores incrementos en la productividad de celulosa por hectárea ocurren en la zona sureste como resultado de la ya conocida mejor adaptación de esta especie a este tipo de sitios.

En todos los casos se observa que el incremento en la productividad de celulosa por hectárea está explicado en

mayor medida por el crecimiento que por la densidad y el rendimiento pulpable debido, como fuera señalado anteriormente, al poco cambio relativo en las propiedades pulperas de la madera (Cuadro 5).

Desde el punto de vista de la producción de una planta como la instalada en el país (1.000.000 t celulosa/año) la posibilidad de reducir el consumo de madera por ejemplo en 8,5% implicaría una reducción en el volumen anual de madera de 260.000 m³ para el abastecimiento de la misma (3,32 vs 3,06 m³/t).

Longitud de fibras

Analizando los valores de longitud de fibra obtenidos para las dos edades de cada sitio se observa un incremento lo cual debería provocar una mejora de las propiedades papeleras (Cuadro 6). El aumento de la longitud de las fibras ocurre debido al aumento en el largo de las células del cámbium que son las que dan origen a las mismas. La estabilización del largo de las fibras sucede cuando las células del cámbium alcanzan la máxima longitud momento a partir del cual comienza la formación de madera adulta (Panshin y Zeeuw, 1970). A medida que aumenta el número de periodos de crecimiento las células (fusiformes) del cámbium aumentan su longitud. Este aumento se detiene a partir de cierto momento, manteniéndose una longitud promedio relativamente cons-

tante por el resto del crecimiento del árbol (Díaz-Vas Olmedo, 2003). De acuerdo a algunos autores evaluando *E.globulus*, ocurre un aumento continuo en el largo de las fibras hasta aproximadamente los 10 años de edad (Tomazello Filho, 1987; Melo *et al.*, 1991). Esto estaría indicando que para esta especie ocurriría una estabilización de largo de las fibras y por tanto la formación de madera adulta a edades superiores a esta. Por otro lado, Doldán (2003) determinó que en *E.grandis*, ocurre un incremento de la longitud de las fibras a medida que aumenta la edad de árboles, ocurriendo una estabilización de esta variable a aproximadamente 40% del radio. De acuerdo a esta evaluación el comienzo de formación de madera adulta comenzaría en etapas tempranas del cultivo, teniendo en cuenta que los primeros anillos de crecimiento ocupan una mayor proporción en el radio que los anillos formados en etapas posteriores del ciclo. Resultados obtenidos por Gomes da Silva y Braga (1997), con *E.urophylla* muestran que hasta el séptimo año el largo de las fibras continúa aumentando, indicando la presencia de madera fisiológicamente juvenil del ciclo del árbol.

En los resultados presentados en el Cuadro 6 no es posible visualizar la tendencia de los valores de longitud de las fibras ya que hasta el momento se cuenta con solo dos edades evaluadas.

Cuadro 6. Longitud de fibras y propiedades papeleras de resistencia a diferentes niveles de refinado para las parcelas evaluadas en los dos momentos de cosecha.

		ORÍGENES								
		Jeeralang				Chivilingo				
		Litoral		sureste		Litoral		Sureste		
Edad (años)		8,6	10,7	7,6	9,8	6,9	9,1	6,6	8,7	
Longitud de fibras (micras)		969	1012	962	1046	956	1026	930	1039	
Grado de refinado		Revoluciones								
Sin refinado		0	0	0	0	0	0	0	0	
		Tracción								
		x	156	244	164	237	189	256	153	236
		Desgarro								
		56		35		45		54		
		Revoluciones								
CSF 400		3000	2873	3000	2873	3000	2873	3000	2873	
		Tracción								
		x	696	706	664	761	714	879	606	847
		Desgarro								
		2		15		23		40		
		2370	1929	2370	1929	2370	1929	2370	1929	
SRo 25		Tracción								
		x	644	678	620	710	679	824	577	777
		Desgarro								
		5		15		21		35		

Las características de las fibras determinan las propiedades papeleras porque estas son el elemento anatómico más abundante de la madera (Foelkel, 2007) representando alrededor del 65% de la misma para el caso de *E. globulus* (Barrichelo y Brito, 1976).

Los valores promedio de largo de fibra obtenidos con las probetas A y B son muy similares entre todas las parcelas evaluadas. La diferencia observada en los valores de longitud de fibra ponderada es atribuible al cambio en la longitud de fibra promedio en la probeta C (más cercana a la corteza), como producto del crecimiento experimentado en los dos años.

En la Figura 6 se presentan los datos obtenidos para una muestra discriminados por la posición en el radio del fuste donde es posible visualizar el aporte de cada posición en la longitud de fibras total. Es importante tener en cuenta que cada muestra obtenida de médula a corteza corresponde a un volumen diferente de madera y por consiguiente aporta cantidades de fibras en diferente proporción.

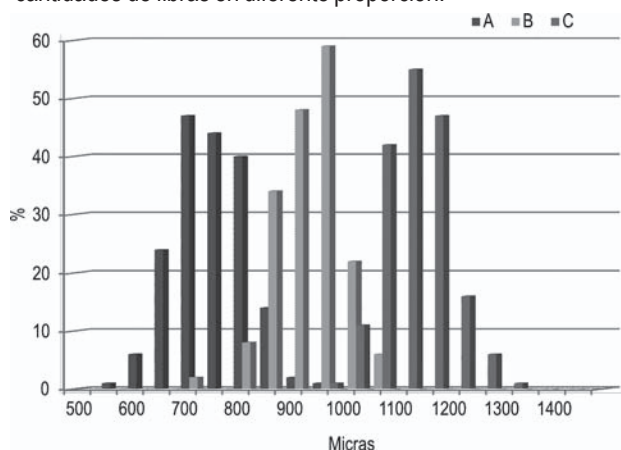


Figura 6. Frecuencia de las longitudes de fibra para las probetas A, B y C para todos los árboles de 9 años.

En la Figura 7 se presenta la distribución de las fibras en la probeta C para la parcela de Chivilingo en sureste cuando se comparan las dos edades. En este caso, a los 6,6 años se observó una distribución más expandida que la que se observa para la edad 8,7 años, lo cual indica que esta última no solo contiene fibras más largas sino además menor variabilidad en el largo de las mismas.

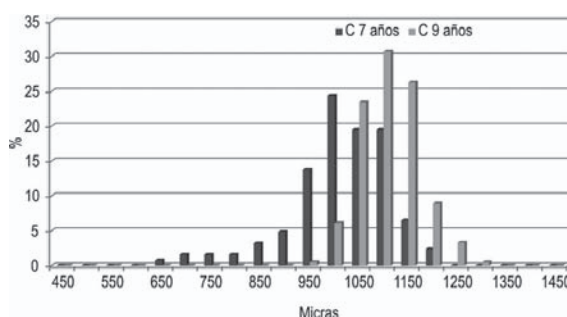


Figura 7. Frecuencia de longitud de fibra para la probeta C.

Propiedades papeleras

En el Cuadro 7 se muestran los resultados del índice de tracción x índice de desgarro y la evolución de este parámetro en los dos momentos de cosecha, para las pulpas blanqueadas sin refinar (0 rev) y refinadas para valores prefijados de drenabilidad de CSF 400 y SR° 25. La evolución de la resistencia de las fibras es en todos los casos positiva (%DIF > 0), lo cual indica que en todos los casos evaluados se produce una mejora en la resistencia del papel formado al aumentar la edad de cosecha. Esta mejora es atribuible mayormente al aumento en la longitud de fibra, lo cual se observa en la mayor respuesta (porcentaje de incremento) en las resistencias de las fibras sin refinar con respecto a las pulpas refinadas.

Cuadro 7. Comparación de capacidad de refino del muestreo de *E. globulus* vs una pulpa de origen comercial (mezcla de eucaliptos).

	Momentos de cosecha							
	1				2			
	Jeeralang	Chivilingo	Jeeralang	Chivilingo	Jeeralang	Chivilingo	Jeeralang	Chivilingo
Sitio	Litoral	Litoral	Sureste	Sureste	Litoral	Litoral	Sureste	Sureste
Edad (años)	8,6	6,9	7,6	6,6	10,7	9,1	9,8	8,7
Grado de refino								
0	-37,4	-24,3	-34,5	-38,7	-2,4	2,4	-5	-5,7
CSF 400	3,1	5,9	-1,6	-10,1	4,7	30,2	12,8	25,5
SRo 25	3,6	9,2	-0,4	-7,2	9	32,6	14,2	25

La influencia del largo de las fibras en las propiedades de resistencia del papel se explica por el hecho de que con fibras más largas hay menor posibilidad de que las mismas sean separadas de la estructura del papel cuando este es sometido a un esfuerzo. Por otro lado con fibras más largas se incrementa la capacidad de desfibramiento durante el proceso de refinado aumentando por tanto la capacidad de interligamiento entre fibras (Barrichelo y Brito, 1976). En todas las parcelas se observa que en el segundo muestreo existe un menor requerimiento de energía (evidenciado en el número de revoluciones aplicadas) para alcanzar algunos de los grados de refinado más utilizados a nivel industrial. De la misma forma, se observa que la respuesta a la intensidad de refinado (medida como número de revoluciones para alcanzar por ejemplo SR° 25) está relacionada con la densidad de la madera. En este sentido se destaca el mejor desempeño de la parcela de Chivilingo en la zona sureste con un incremento del 35% en la resistencia al cambiar en dos años el turno de cosecha.

El extremo opuesto lo obtiene la parcela de Jeeralang en la zona sureste con un incremento de 5%. Este diferente comportamiento frente al refinado podría estar relacionado al espesor de la pared de las fibras, lo que a su vez—como fue mencionado anteriormente— está estrechamente ligado a la densidad de la madera (Scaramuzzi, 1961; Repetti, 1990; Foelkel, 2007). No obstante, el posible aumento en el espesor de las fibras en la parcela de Chivilingo en el sureste no se ve reflejado en una mayor dificultad de refinado para obtener un determinado grado de entrelazado de las fibras. La mayor colapsabilidad de las fibras podría estar explicada por otras relaciones determinadas por las dimensiones de las fibras como el diámetro y espesor de las fibras, diámetro del lumen de las mismas, *coarseness* o por el contenido de hemicelulosas.

Al comparar los materiales provenientes de los momentos de cosecha con pulpas comerciales provenientes de mezclas de *Eucalyptus* y ensayadas en las mismas condiciones (Cuadro 7) se observa que con el primer momento de cosecha no se obtienen valores aceptables de resistencia para las fibras sin refinar. Sin embargo, se aprecia una recuperación al realizar el proceso de refinación.

Los valores obtenidos en el segundo momento de cosecha presentan mínimas diferencias en los valores de tensión x desgarrado cuando la intensidad de refinado es cero. Esto indica que la calidad de la fibra se vio incrementada con respecto a dos años antes y que se encuentra al mis-

mo nivel que las pulpas de origen comercial. Esta mejora en la calidad de las fibras estaría asociada al aumento de la longitud (como fuera mencionado anteriormente) y posiblemente a algunos aspectos de la composición química. En ese sentido, existe abundante literatura que muestra que las hemicelulosas presentes en la pared de las fibras son responsables del mayor entrelazado de las mismas en respuesta al refinado y del mayor "hinchamiento" producido por el agua, lo cual favorece el refinado (Da Silva *et al.*, 1982; Milanez *et al.*, 1982; Foelkel, 2009a, 2009b). *E.globulus* se caracteriza en general por tener altos valores de resistencia debido a su relativo alto contenido de hemicelulosas con respecto a otras especies de eucaliptos (Queiroz, 1972; Bustamante y de los Santos, 1981). La respuesta al incremento de la intensidad de refinado indica que el origen Chivilingo consigue desarrollar mejores aptitudes (mayor a 25%) que pulpas comerciales obtenida de mezcla de varias especies.

Conclusiones

Con el incremento de la edad de cosecha en aproximadamente dos años se observa un aumento en el crecimiento tanto individual como por hectárea, siendo más notorio para el caso de Chivilingo en sureste. En todas las parcelas los valores de IMA tienden a disminuir. La densidad de la madera no aumenta significativamente salvo para Chivilingo en sureste que muestra un incremento de casi 5%. El rendimiento pulvable muestra una mejora sustancial en las parcelas del sureste (en el entorno de 2%). Debido al aumento de la densidad de la madera e incremento de rendimiento Chivilingo mostró mayor reducción en los niveles de consumo específico (8,5%).

Se observa para todos los muestreos un incremento en la longitud de fibra ponderada. La evolución de la resistencia de las fibras es en todos los casos positiva produciéndose una mejora en el desempeño del papel formado. Esta mejora sería atribuible mayormente al aumento en la longitud de las fibras. La comparación realizada con pulpas de origen comercial indica que la calidad de la fibra se vio incrementada en todos los casos en el segundo turno de cosecha. En cuanto a la respuesta a la intensidad de refinado, el origen Chivilingo consigue desarrollar mejores aptitudes (mayores a 25% con respecto a pulpas comerciales obtenidas de mezclas).

Bibliografía

- Alencar GSB.** 2002. Estudo da qualidade da madeira para produção de celulose relacionada a precocidade na seleção de um híbrido *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. [Tesis de Mestría]. Piracicaba : Universidade de São Paulo. 73p.
- Backman M, Garcia De León J.** 2003. Correlations of pulp and paper properties at an early age and full rotation age of five eucalyptus species. En: 28th EUCEPA Conference : sustainable development for the pulp and paper industry : proceedings, oral and poster presentations; 2 - 4 abril 2003; Lisboa. Lisboa : Tecnicalpa. pp. 108 - 112.
- Balmelli G.** 2002. Comportamiento relativo de *Eucalyptus globulus* en Zona 2. En: Seminario "Mejoramiento genético, silvicultura y sanidad de *Eucalyptus globulus* en la región Sureste". Montevideo : INIA. (Actividades de difusión; 289). pp. 3 - 7.
- Barrichelo L.** 2001. Pesquisa em qualidade da madeira [Cd-Rom]. En: I Workshop núcleo de pesquisa em celulose e papel ; 21 - 22 noviembre; Piracicaba, SP. Piracicaba : Departamento de Ciências Florestais.
- Barrichelo L, Brito J, Couto T, Campinhos E.** 1983. Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento em celulose de madeira de *Eucalyptus grandis*. *Silvicultura*, 8(32): 802 - 808.
- Barrichelo L, Brito J.** 1976. A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel. *Serie Divulgação PRODEPEF*, 13: 1 - 145.
- Bassa A.** 2002. Processos de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*) [Tesis de Mestría]. Piracicaba: Universidade de São Paulo. 103p.
- Bassa A.** 2001. Estudo do comportamento de carboidratos em processos de polpação kraft convencional e modificado [Cd-Rom]. En: I Workshop núcleo de pesquisa em celulose e papel ; 21 - 22 noviembre; Piracicaba, SP. Piracicaba : Departamento de Ciências Florestais.
- Broglio da Rosa C, Cardoso G, Frizz S, Foelkel C, De Assis T, De Oliveira P.** 2002. Comportamento da madeira de *Eucalyptus globulus* com diferentes teores de lignina para produção de celulose Kraft [Cd-Rom]. En: 35 Congresso e Exposição anual de celulose e papel da ABTCP; 14 - 17 octubre; San Pablo, Brasil. San Pablo : ABTCP.
- Bustamante L, de los Santos J.** 1981. Aptitudes de diferentes espécies de *Eucalyptus* como matéria prima celulósica. En: II Congreso Latinoamericano de Celulosa y Papel; 22 - 26 junio; Torremolinos, Málaga, España. Torremolinos : Instituto Papelero Español. pp. 317 - 332.
- Colodette J, Magaton A, Gomes AF, Gomide J, Morais PHD.** 2008. *Eucalyptus* wood quality and its impact on kraft pulp production and utilization [En línea]. En: Towards Understanding Wood, Fibre and Paper – deeper knowledge through modern analytical tools; 19 - 21 mayo; Turku, Finland. Turku : Abo Akademi Process Chemistry Center. Consultado 8 noviembre 2012. Disponible en: http://www.vtt.fi/liitetiedostot/uuut/coste41_turku_u_Colodette.pdf.
- Crechi E, Fassola EH, Barth S, Keller A, Costa J.** 2006. Comparación para la mesopotamia y ajuste para Misiones -NE de Corrientes Argentina, de ecuaciones de volumen total para *E. grandis* Hill ex Maiden [Cd-Rom]. En: 12as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Monte Carlo : UNAM, INTA. 29p.
- Da Silva Pirez F, Su Sun Kuan G, Celi Benazzi R.** 1982. Preparo da massa. En: Celulose e Papel : Tecnologia de fabricação do papel. San Pablo : SENAI, IPT. pp. 23 - 100.
- Damasceno P.** 2008. Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa. [Tesis de maestría]. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa. 79p.
- De Carvalho H.** 1997. Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto. [Tesis de maestría]. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa. 121p.
- Díaz-Vas Olmedo J.** 2003. Anatomía de Maderas. Valdivia : Universidad Austral de Chile. 151p.
- Doldán J.** 2007. Evaluación de parámetros de calidad de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii* de plantaciones uruguayas para pulpa de celulosa. *Nota técnica (LATU)*, 8: 8p.
- Doldán J.** 2003. Proyecto de tecnología de ensayo de productos forestales LATU-JICA (1998-2003) : Indicadores de calidad de madera de *Eucalyptus grandis* de Río Negro, Uruguay : contenido de humedad, densidad, contracción y largo de Fibras. Montevideo : LATU, JICA. 40p. (Informe de Investigación ; 9).
- Ferreira C, De Freitas M, Ferreira M.** 1979. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de MOGI-GUAÇÚ (S.P.). *IPEF*, 18: 106 - 117.
- Ferreira C, De Freitas M, Ferreira M.** 1978. Variação da densidade básica da madeira de eucalyptus spp em função da idade e qualidade de Local. *Boletim Informativo IPEF*, 6(20): 15 - 24.
- Foelkel C.** 2009a. O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor kraft de cozimento [En línea]. ABTCP. 97p. (*Eucalyptus* on line book & newsletter). Consultado 20 diciembre 2011. Disponible en: http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnacaoCavacos.pdf.
- Foelkel C.** 2009b. Individualização das fibras da madeira do eucalipto para a produção de celulose kraft [En línea]. ABTCP. 107p. (*Eucalyptus* on line book & newsletter). Consultado 20 diciembre 2011. Disponible en: http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT16_IndividualizacaoFibras.pdf.
- Foelkel C.** 2007. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel [En línea]. ABTCP. 48p. (*Eucalyptus* on line book & newsletter). Consultado 20 diciembre 2011. Disponible en: http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03_fibras.pdf.
- Foelkel C.** 1978. Madeira do eucalipto : da floresta ao digestor. Belo Oriente : CENIBRA. 25p.
- Foelkel C.** 1974. Produção em laboratório de celulose sulfato de madeira de *Eucalyptus globulus*. *IPEF*, 9: 61 - 77.
- Foelkel C, Mora E, Menochelli S.** 1992. Densidade básica : sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. *O papel*, 53(5): 35 - 40.
- Gomes Da Silva F.** 2001. Processos de Polpação [Cd-Rom]. En: I Workshop núcleo de pesquisa em celulose e papel ; 21 - 22 noviembre; Piracicaba, SP. Piracicaba: Departamento de Ciências Florestais.
- Gomes Da Silva F, Braga E.** 1997. Potencialidade da seleção precoce de *Eucalyptus urophylla* em função da qualidade da madeira destinada a produção de celulose. En: 30 Congresso anual de celulose e papel da São Paulo : ABTCP. pp. 281 - 292.
- Goyal G, Fisher J, Krohn M, Packwood R, Olson R.** 1999. Variability in pulping and fiber characteristics of hybrid poplar trees due to their genetic makeup, environmental factors and tree age. *Tappi Journal*, 82(5): 141 - 147.
- ISO.** 2005. ISO 5269-1: 2005 : Pulps - Preparation of laboratory sheets for physical testing - Part 1: Conventional sheet-former method. Geneva : ISO. 7p.
- ISO.** 2002. ISO 5264-2 : 2002 : Pulps - Laboratory beating - Part 2: PFI mill method. Geneva : ISO. 16p.
- ISO.** 1998. ISO 5270: 1998 : *Pulps - Laboratory sheets –Determination of physical properties*. Geneva : ISO. 8p.
- Melo R, Paz J, Solís A, Carrasco V.** 1991. Ensayos de pulpaje y blanqueo de madera de eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) [En línea]. *Celulosa y Papel*, 7(1): 10p. Consultado julio 2011. Disponible en: http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/otros/Arquivo%20202a_%20Ensayos%20de%20pulpaje%20y%20blanqueo%20de%20madera%20de%20euca.pdf.

- Milanez A, Barth P, Pinho N, Vesz J.** 1982. Influencia das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecánicas da polpa. En: XV Congresso Anual da ABCP: Semana do Papel; 22 - 26 novembro; São Paulo, Brasil. São Paulo : ABTCP. pp. 155 - 170.
- Panshin AJ, Zeeuw C.** 1970. Textbook of wood technology. 3 ed. vol. 1. New York : McGraw-Hill.
- Pereira DED, Demuner BJ, Bertolucci FLG, Pasquali SM.** 1994. A relação guaiaçil/siringil como critério de seleção de árvores e sua importância no processo de deslignificação. En: 1º Congresso Latinoamericano de Deslignificação; 8 - 12 agosto 1994; Vitória, Brasil. Vitória: ABTCP. pp. 21 - 31.
- Queiroz M.** 1972. Comportamiento de varias especies de Eucalipto en la obtención de pastas sulfato. *Investigación y Técnica del Papel*, 75: 55p.
- Reina L, Resquin F.** 2011. *Eucalyptus globulus* chemical composition and its effect on Kraft pulping parameters. En: 5ª ICEP International Colloquium on Eucalyptus Pulp; 9 - 12 mayo 2011. Porto Seguro, Bahia. Viçosa : Brazil Universidad Federal de Viçosa. 6p.
- Repetti R.** 1990. Relación entre las características de la madera y las propiedades del papel. En: Seminario sobre calidad de la madera en la producción forestal. Buenos Aires : CIEF. pp. 11 - 30.
- Resquin F, Barrichelo L, Da Silva Jr, Brito J, Sansigolo C.** 2006. Wood quality for kraft pulping of *Eucalyptus globulus* origins planted in Uruguay. *Scientia Forestalis*, 72: 57 - 66.
- Resquin F, Balmelli G.** 2005. *Eucalyptus globulus*: Importancia de la elección de la fuente de semilla. *Revista INIA*, 3: 26 - 29.
- Resquin F, De Mello J, Fariña I, Mieres L, Assandri L.** 2004. Caracterización de la celulosa de especies del género *Eucalyptus* plantadas en Uruguay. Montevideo : INIA. 82p. (Serie Técnica ; 152).
- Rezende M, Ferraz E.** 1985. Densidade anual da madeira de *Eucalyptus grandis*. *IPEF*, (30): 37 - 41.
- Santos C.** 2000. Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa kraft-AQ [Tesis de maestría]. Piracicaba: Universidade de São Paulo. 117p.
- Scaramuzzi G.** 1961. First data on the volume proportions of Wood tissues in some Italian grown *Eucalyptus*. En: 2 Conferencia mundial do eucalipto; São Paulo. Relatório e documentos. vol. 2. São Paulo: FAO. pp. 1351 - 1357.
- Simeto S, Balmelli G, Martínez Crosa G, Torres Dini D.** 2009. La enfermedad causada por *Mycosphaerella* spp. y *Teratosphaeria* spp.: una seria amenaza a las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Uruguay. *Revista INIA*, 20: 48 - 50
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry.** 2006. Standard Test Methods [Cd-rom]. Atlanta: TAPPI.
- Tomazello Filho M.** 1987. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. *IPEF*, (36): 35 - 42.
- Trugilho F, Lima T, Mendes L.** 1996. influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Revista Cerne*, 2(1): 15p.
- Turner CH, Balodis V, Dean GH.** 1983. Variability in pulping quality of *E. globulus* from Tasmanian provenances. *Appita*, 36(5): 371 - 376.
- Vasconcelos Dias R, Silva Junior C.** 1985. A influencia da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas e propriedades de polpação e do papel. En: 18 Congresso Anual da ABTCP : Semana do papel; 1985; São Paulo : ABTCP. pp. 31 - 55.
- Vital BR, Pereira AR, Della Lucia RM, Andrade DC.** 1984. Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivado na região do cerrado de Minas Gerais. *Boletim Técnico IBDF*, (8): 49 - 52.