

ARTÍCULOS

Variación de la densidad de la madera y rendimiento pulpable en clones de *Eucalyptus globulus* evaluado con espectroscopía de infrarrojo cercanoVariation in wood density and pulp yield in *Eucalyptus globulus* clones evaluated with near infrared spectroscopy**Rodrigo Labbé ^a, Fernando Droppelmann ^{b*}, Claudio Balocchi ^c, Miguel Peredo ^c**^aUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Escuela de Graduados, Valdivia, Chile.^{*}Autor de correspondencia: ^bUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, casilla 567, Valdivia, Chile, tel.: 56-63-211436, fdoppel@uach.cl^cBioforest, Camino a Coronel, km 15, Concepción, Chile.

SUMMARY

Density variation, being the timber longitudinally measured, and the precision of spectroscopy of near infrared (NIR) were evaluated to predict density and pulp yield in two *Eucalyptus globulus* clones. Furthermore, variability in volume and in NIR predictions was evaluated in four *E. globulus* clones represented in two growth sites. Clones were selected by means of two trials: 10 and 11 year old clones in two sites from Araucanía Region, Chile. From each selected ramet, shavings samples at breast height diameter (BHD) were obtained to NIR predictions. Additionally, of a subgroup of ramets, chips samples from all the timber and six disks BHD, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % and 100 % of commercial height were obtained. NIR predictions were contrasted with values obtained for chips and disks by means of standard error of prediction (SEP) and bias. Variance analyses of two factors (clones and sites) and correlation analyses were used. Density showed an increase from the base to the apex in both clones, though with a different variation profile; consequently, clones presented a different mean density, nonetheless their BHD was similar. NIR predictions showed an error inside the rank given for *E. globulus*, being those from pulp yield especially exact. Concerning volume, density and pulp yield showed low variability, both among clones and response to the site as well.

Key words: clone silviculture, wood properties, near infrared spectroscopy (NIR), standard error of prediction (SEP), interaction genotype × environment.

RESUMEN

Se evaluó la variación de la densidad en el sentido longitudinal del fuste y la precisión de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) para predecir densidad y rendimiento pulpable en dos clones de *Eucalyptus globulus*. Se evaluó, además, la variabilidad del volumen y de las predicciones NIR en cuatro clones de *E. globulus* representados en dos sitios de crecimiento. Los clones fueron seleccionados en dos ensayos clonales de 10 y 11 años de edad, en dos sitios de la región de La Araucanía, Chile. De cada rameto seleccionado se obtuvieron muestras de viruta a 1,3 m para las predicciones NIR. Adicionalmente, de un subgrupo de rametos se obtuvieron muestras de astillas de todo el fuste y seis discos: DAP (1,3 m), 20, 40, 60, 80 y 100 % de altura comercial. Las predicciones NIR fueron contrastadas con los valores de astillas y discos mediante el error estándar de predicción y sesgo. Se utilizó análisis de varianza de dos factores (clones y sitio) y análisis de correlación. La densidad presentó un aumento desde la base hacia el ápice en ambos clones, pero con distinto perfil de variación, en consecuencia, los clones presentaron una densidad promedio diferente a pesar de su similar densidad al DAP. Las predicciones NIR arrojaron un error dentro del rango descrito para *E. globulus*, siendo especialmente precisas las de rendimiento pulpable. La densidad y rendimiento pulpable mostraron, a diferencia del volumen, una baja variabilidad entre clones, al igual que su respuesta al sitio.

Palabras clave: silvicultura clonal, propiedades de la madera, espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR), error estándar de predicción (SEP), interacción genotipo × ambiente.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético forestal constituye una herramienta fundamental para aumentar la productividad de las plantaciones y la calidad de los productos de la madera

(Zobel y Talbert 1992). En este sentido, la importancia de la silvicultura clonal radica en que esta puede capturar una mayor proporción del componente genético, maximizando la ganancia proveniente de la selección en cada ciclo de mejoramiento (Burdon y Libby 2006).

La densidad de la madera y el rendimiento pulpable, junto con el volumen, son los criterios de selección más usados en programas de mejoramiento genético destinados a la industria de la celulosa (McDonald *et al.* 1997, Raymond 2002, Costa *et al.* 2004, 2009). La densidad es un buen indicador de las características físico-mecánicas de la madera y de calidad en la producción de pulpas (Igartúa *et al.* 2000) e influye directamente sobre el rendimiento pulpable por cada metro cúbico de madera rolliza. Ambas propiedades están controladas por un componente genético y también son afectadas por las características del sitio en que crecen los árboles (Zobel y Talbert 1992). En cuanto al componente genético Raymond (2002) revisa una serie de artículos concluyendo que para *Eucalyptus globulus* Labill. los rangos de heredabilidad (H^2) varían entre 0,67 y 1,00 para la densidad y 0,33 a 0,58 para el rendimiento pulpable. Otros autores como Lima *et al.* (2000) y Chen (2006) encontraron diferencias significativas en la densidad entre diferentes clones de *Eucalyptus spp.*, no así en el rendimiento pulpable. En cuanto al componente sitio, Downes *et al.* (1997), Peredo (1999) y Espina (2006) encontraron diferencias significativas al contrastar estas dos propiedades en árboles de *E. globulus* establecidos en sitios con distinta productividad. Respecto de la interacción genotipo \times ambiente de la densidad y rendimiento pulpable en *E. globulus*, los resultados de distintos estudios indican que esta es baja, generando así un impacto modesto en la selección (McDonald *et al.* 1997, Schimleck *et al.* 2000, Raymond *et al.* 2001a, Costa *et al.* 2004, 2009).

Los antecedentes de correlaciones (r) entre crecimiento y densidad o crecimiento y rendimiento pulpable son variados en los distintos estudios. Para crecimiento y densidad los valores de r van desde 0,12 hasta -0,58 y para crecimiento y rendimiento pulpable los valores de r oscilan desde -0,05 hasta -0,43. Las correlaciones entre densidad y rendimiento pulpable muestran generalmente una tendencia positiva siendo en algunos casos significativa, estas van desde -0,20 hasta 1,00 (Raymond *et al.* 2001a, Raymond y Schimleck 2002, Apiolaza *et al.* 2005, Espina 2006).

La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) ha permitido caracterizar estas y otras propiedades de la madera con claras ventajas, debido a que es un método no destructivo, rápido y fácil de utilizar, lo cual disminuye significativamente los costos de análisis (Schimleck 2007). El principio fundamental de esta tecnología radica en que determinados compuestos van a absorber determinados espectros de longitudes de onda, de esta manera cada molécula orgánica va a tener un espectro propio y único, similar a una huella digital (Schimleck 1999). Así, cada muestra analizada presentará una curva con extremos ubicados en determinadas longitudes de onda, correspondientes a bandas de absorción originadas por la presencia de ciertos componentes orgánicos, con la aplicación de la quimiometría, esto permite predecir su composición a través de relaciones matemáticas previamente establecidas entre las bandas de absorción o reflexión de la luz infrarroja y los parámetros que se quieren analizar (Skoog y Leary 1994).

Para *E. globulus* Schimleck (1999), Schimleck *et al.* (2000), Raymond *et al.* (2001ab), Schimleck y French (2002), Ruiz *et al.* (2005) y Costa *et al.* (2009) usaron espectroscopía de infrarrojo cercano para predecir densidad o rendimiento pulpable. Otros estudios en esta especie han caracterizado el módulo de elasticidad, contenido de celulosa, lignina y resinas (Schimleck *et al.* 2001, Baillères *et al.* 2002, Raymond y Schimleck 2002).

El grado de precisión de las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano, en estos y otros estudios, ha sido variable. Por ello, Schimleck (2007) señala que el uso de espectroscopía de infrarrojo cercano presenta las siguientes interrogantes: ¿Es posible obtener una predicción razonable utilizando modelos ajustados para varias especies y sitios? (modelos generales o modelos locales), ¿se puede usar un modelo ajustado para una condición de sitio para estimar con precisión propiedades de la madera para muestras de sitios diferentes? y, ¿se puede predecir propiedades de la madera a nivel promedio de todo el fuste utilizando muestras ubicadas a una altura específica? Al respecto, el mismo autor menciona que aunque para un amplio territorio es deseable el desarrollo de modelos generales respecto a numerosos modelos locales, debido a que se requiere de un menor número de muestras, los resultados de varios estudios indican que las predicciones obtenidas con modelos generales no serán tan precisas como las obtenidas con modelos generados para una especie y sitio en particular. Schimleck (2007) también señala que, aunque la precisión de las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano obtenidas con modelos ajustados para otra condición de sitio es menor, existen pocas posibilidades de perder un buen genotipo usando estos modelos, especialmente, cuando la selección se hace en base a promedios familiares o clonales y no en individuos (Schimleck *et al.* 2000). Además, una forma de mejorar estas predicciones es incorporando un pequeño número de muestras del nuevo sitio al grupo de datos original, Schimleck *et al.* (2005) encontraron que la adición de cinco muestras del nuevo sitio significó una mejora en las predicciones de rendimiento pulpable desde un error estándar de predicción (SEP) de 4,50 % a 1,03 %. Por último, Schimleck (2007), revisando una serie de estudios, concluye que las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano de diferentes propiedades de la madera, entre ellas densidad y rendimiento pulpable, obtenidos con modelos ajustados con muestras de madera extraídas a una altura específica o con mezclas de astillas extraídas de todo el fuste, son estadísticamente similares, sin embargo, el mismo autor agrega que se debe esperar un mayor error en las predicciones mediante espectroscopía de infrarrojo cercano con modelos ajustados con el primer tipo de muestras, debido a que estas no necesariamente reflejan la variabilidad específica de cada árbol.

Este trabajo contempla dos hipótesis. Hipótesis uno: los perfiles de variación de densidad y rendimiento pulpable en el sentido longitudinal del árbol son diferentes de-

pendiendo del genotipo (clon), aspecto que genera errores en las predicciones de los valores medios totales usando la metodología de predicción con espectroscopía de infrarrojo cercano y sistemas tradicionales. Hipótesis dos: la variación en crecimiento es de mayor magnitud que la variación en propiedades de la madera.

De esta forma, el presente estudio tiene como primer objetivo determinar el grado de variación de la densidad en el sentido longitudinal del fuste y evaluar la habilidad de la espectroscopía de infrarrojo cercano para predecir densidad y rendimiento pulvable, en dos clones de *E. globulus* ubicados en dos sitios de crecimiento. El segundo objetivo es evaluar la variabilidad del volumen y de las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano de densidad y rendimiento pulvable de cuatro clones de *E. globulus* establecidos en dos sitios de crecimiento.

MÉTODOS

El estudio se realizó en dos ensayos clonales de *E. globulus* pertenecientes a Forestal Probosque Ltda., ubicados en la región de La Araucanía, provincia de Cautín, Chile. El ensayo La Peña y el ensayo Santa Julia se encuentran distantes a 10 y 15 km al oeste de la ciudad de Nueva Imperial, respectivamente. De acuerdo a la clasificación Koeppen, en ambos ensayos el clima es templado cálido con menos de cuatro meses secos (Donoso 1992). Existe una frecuencia de heladas de cinco a veinte días por año y una precipitación anual entre 900-1.500 mm (Schlatter *et al.* 1994). En La Peña el suelo está compuesto por cenizas volcánicas modernas depositadas sobre un estrato de gravas redondeadas de origen aluvial con cierto grado de compactación, son suelos delgados a moderadamente profundo

con drenaje moderado a lento (Tosso 1985) (cuadro 1). En Santa Julia el suelo corresponde a un rojo arcilloso derivado de cenizas volcánicas antiguas, son suelos profundos bien desarrollados y de buen drenaje.

Evaluación dasométrica. En cada ensayo se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP) y altura de todos los árboles con un DAP > 10 cm. Con estos datos se calculó el volumen de cada rameto ($m^3 \text{ árbol}^{-1}$) mediante una función de volumen para *E. globulus* ajustada por la empresa Probosque Ltda. Para la zona. Con esta información se determinó el valor genético (VG) de cada clon (Droppelmann *et al.* 2002). Posteriormente fueron seleccionados los cuatro clones con mayor valor genético que estuviesen presentes en ambos ensayos (clones 110, 36, 47 y 57).

Selección de árboles y toma de muestras. De cada clon seleccionado, se muestrearon cuatro rametos por ensayo, utilizando el siguiente procedimiento:

- En cada ensayo se consideraron solo los rametos con un volumen mayor a su media clonal. De este grupo se calculó el volumen promedio y se seleccionaron los cuatro rametos con el valor más cercano a este.
- A estos rametos en pie se les extrajo una muestra de viruta de aproximadamente 200 g a la altura del DAP para las determinaciones con espectroscopía de infrarrojo cercano, utilizando una broca para madera de 12 mm de diámetro.
- Posteriormente, de estos cuatro clones se escogió el clon de mayor volumen de cada ensayo, clon 110 en La Peña y clon 36 en Santa Julia, y de este se seleccionaron al azar tres de los cuatro rametos muestreados en el punto anterior; estos rametos fueron volteados y su

Cuadro 1. Información del sitio y los ensayos.
 Information about trial and sites.

Características de los ensayos	La Peña	Santa Julia
Latitud S	38° 46'	38° 52'
Longitud O	73° 02'	72° 57'
Altitud (m s.n.m.)	50	110
Topografía	Pendiente suave	Pendiente suave
Serie de suelo	Terrazas aluviales	Metrenco
Calidad de sitio*	Peor	Mejor
Edad de clones (al momento de la medición)	11	10
Diseño experimental del ensayo	Parcelas de 5 árboles en hilera	Un árbol una parcela
N° de bloques	15	30
N° de clones	13	27
Controles (provenientes de semilla)	1	0
Espaciamiento (m)	2,5 x 3	2,5 x 2,5
Número de árboles (ensayo)	1.050	810

*Clasificación realizada en base a Schlatter *et al.* (1994).

fuste dividido en cinco quintos (medido desde la base hasta un índice de utilización (i.u.) de 6 cm).

- En la parte central de cada quinto se obtuvo un trozo de un metro de largo, los cuales fueron astillados, mezclados y tamizados para obtener una sola muestra de aproximadamente 3 kg representativa de todo el fuste (Peredo *et al.* 2006).
- Del mismo fuste se obtuvieron seis discos, cinco discos al término de cada quinto más uno adicional a la altura del DAP (discos al DAP, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de altura comercial, i.u. 6 cm).

Determinación de propiedades. El tratamiento de las virtutas y todos los aspectos metodológicos para las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano se realizaron utilizando la metodología descrita por Ruiz *et al.* (2005). El modelo utilizado fue ajustado con muestras obtenidas de plantaciones de *E. globulus* de 4 a 20 años de edad, provenientes de las regiones del Maule, del Biobío, de La Araucanía y de Los Ríos. Mayores especificaciones sobre el modelo pueden ser consultadas a Bioforest S.A.¹

La densidad de cada rodela y de las astillas fue determinada con el método de desplazamiento de agua según norma TAPPI 258 om-94.

Los pulpajes fueron realizados con las muestras de astillas con tres repeticiones por clon, en un digestor M/K de 10 litros, con recirculación de licor. Las condiciones operacionales fueron las siguientes: relación licor-madera: 4/1; temperatura máxima: 165 °C; tiempo a temperatura máxima: 120 minutos; carga de álcali (Na₂O): 16 %; sulfidez: 30 %. El rendimiento pulpable se determinó después de lavar, clasificar y secar al aire la pulpa. El índice kappa resultante fue de 14,8 determinado por norma TAPPI 236 om-85.

Análisis de datos. Se contrastó las diferentes metodologías utilizadas en este estudio mediante el error estándar de predicción (SEP) [1] (Schimleck *et al.* 1999) y sesgo estadístico (BIAS)[2] (Morales 2005).

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NP} (\hat{y}_i - y_i)^2}{(NP - 1)}} \quad [1]$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{NP} (\hat{y}_i - y_i)}{NP} \quad [2]$$

Donde:

\hat{y}_i = Valor real (densidad o rendimiento pulpable de astillas).

y_i = Valor estimado (densidad de discos o predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano).

NP = Número de observaciones.

El SEP indica el error probable que se comete al estimar la variable dependiente (densidad o rendimiento pulpable). El BIAS es una medida de sesgo, un BIAS positivo indica subestimación y un BIAS negativo sobreestimación (Morales 2005). También se utilizó estadística descriptiva, análisis de varianza de dos factores (clones y sitio), prueba de multicomparación de medias de Duncan y correlación de Pearson.

RESULTADOS

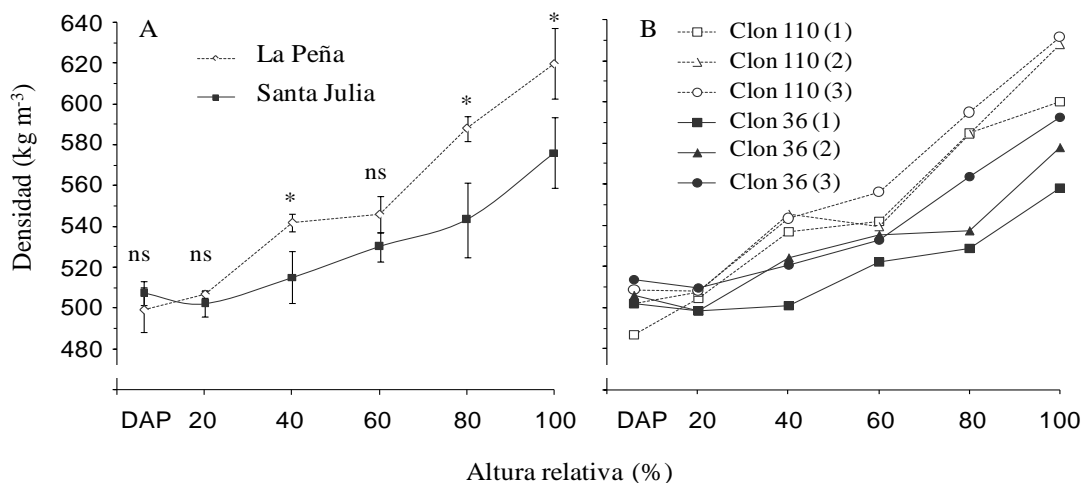
Variación de la densidad en el sentido longitudinal. Los dos clones analizados mostraron un aumento de la densidad en el sentido longitudinal (figura 1). La densidad entre clones fue significativamente distinta para las muestras tomadas al 40 %, 80 % y 100 % de altura, no habiendo diferencias al DAP, al 20 % y al 60 % de altura (figura 1A). Consistentemente, desde el 40 % y hasta el 100 % de altura siempre la densidad de los tres rametos del clon 36 fue menor a los tres rametos del clon 110 (figura 1B).

Considerando los seis puntos muestreados a lo largo del fuste (figura 1), el punto de densidad más representativo del clon 110 se presentó al 20 % de altura, con un valor de 506,6 kg m⁻³ sobre una densidad promedio de astillas de 515,3 kg m⁻³ (error estándar de predicción = 17,6 kg m⁻³), mientras que en el clon 36 se registró a la altura del DAP, con una densidad de 507,1 kg m⁻³ sobre una densidad promedio de astillas de 507,9 kg m⁻³ (error estándar de predicción = 1,5 kg m⁻³).

Predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano versus mediciones de discos y astillas. Para la densidad, tanto las muestras de discos como las determinaciones con espectroscopía de infrarrojo cercano arrojaron un error estándar de predicción mayor en el clon 110 respecto al clon 36 (cuadro 2). En el clon 110 el menor error estándar de predicción, respecto de la densidad de astillas, correspondió a las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano, mientras que el mayor error estándar de predicción se registró en la rodela ubicada al 40 % de altura. En el clon 36 se registró el menor error estándar de predicción, respecto de la densidad de astillas, en la rodela ubicada al DAP y el mayor error estándar de predicción correspondió a las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano. El sesgo indica en ambos clones, que la densidad al DAP y las predicciones NIR subestiman la densidad de astillas, mientras que con la rodela al 40 % de altura, la densidad se sobreestima. Para rendimiento pulpable, el sesgo fue muy bajo en ambos clones, indicando subestimación respecto al valor de astilla.

Las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano presentaron mayor desviación estándar que los otros métodos tradicionales, la excepción correspondió a la predicción de rendimiento pulpable del clon 110 que presenta la menor desviación estándar (cuadro 2). Otro punto importante de destacar es que en ambos clones las prediccio-

¹ www.arauco.cl / bioforest@arauco.cl/ Bioforest, Camino a Coronel, km 15, Concepción, Chile.



Longitudinal basic density. A) Mean values B) single ramet value. Bars indicate standard deviation. La Peña trial (11 years old) and Santa Julia trial (10 years old). Each relative height shows if there is significant differences between both clones: * = $P < 0.05$, ns = not significant.

Cuadro 2. Densidad de la madera y rendimiento pulpable según tipo de muestra y método de determinación. Clon 110, ensayo La Peña (11 años de edad) y clon 36, ensayo Santa Julia (10 años de edad).

Wood density and pulp yield depending on sample type and determination method. Clone 110, La Peña trial (11 years old) and clone 36, Santa Julia trial (10 years old).

	Densidad básica (kg m ⁻³)				Rendimiento pulpable (%)	
	Rodela al DAP	Rodela 40 % altura	NIR	Astillas	NIR	Astillas
Nº muestra		Clon 110				
1	486,8	536,8	500,0	526,5	56,4	53,9
2	501,7	545,4	516,2	501,4	55,4	56,6
3	508,5	543,2	478,2	518,0	54,0	55,2
Promedio	499,0	541,8	498,1	515,3	55,3	55,2
Desviación estándar	11,1	4,5	19,1	12,7	1,2	1,4
SEP	28,8	36,6	28,5	-	2,2	-
BIAS	16,3	-26,5	17,2	-	-0,1	-
Nº muestra		Clon 36				
1	502,0	500,6	513,2	504,1	55,6	54,3
2	505,8	523,9	470,1	506,3	52,0	54,4
3	513,5	520,5	508,2	513,3	54,5	53,9
Promedio	507,1	515,0	497,2	507,9	54,1	54,2
Desviación estándar	5,9	12,6	23,6	4,8	1,8	0,3
SEP	1,5	13,6	23,2	-	2,0	-
BIAS	0,8	-7,1	10,7	-	-0,1	-

NIR: predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano a partir de muestras de viruta extraídas a la altura del DAP (1,3 m de altura).

SEP: error estándar de predicción entre el valor de cada método respecto a valor de astillas.

BIAS: Sesgo entre el valor de cada método respecto a valor de astillas.

nes con espectroscopía de infrarrojo cercano registraron el mayor valor de densidad en el rameto de menor densidad de astillas, para el rendimiento pulpable lo mismo ocurrió en el clon 110.

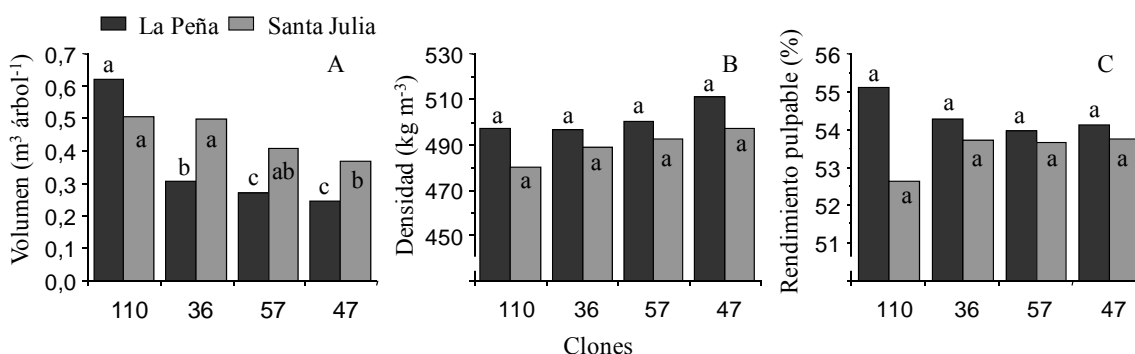
Variación entre clones y sitio. Sólo el volumen presentó diferencias significativas entre clones dentro de cada sitio, para densidad y rendimiento pulpable estas diferencias no fueron significativas (figura 2). Consistentemente, entre clones los coeficientes de variación de las propiedades de la madera analizadas son menores que en volumen. Considerando todos los clones juntos, el volumen presentó un coeficiente de variación de 48,9 % en La Peña y de 32,2 % en Santa Julia, la densidad y el rendimiento pulpable presentaron un coeficiente de variación de 1,3 % y 0,9 % en La Peña y de 1,4 % y de 1,0 % en Santa Julia, respectivamente.

Existieron diferencias significativas entre sitios para las tres variables en estudio (figura 2). No obstante la edad del ensayo Santa Julia es un año menor, presentó un 23 % más volumen que La Peña. La densidad y rendimiento pulpable fueron mayores en La Peña en 2,4 % y 1,8 %, respectivamente. El clon 110 mostró un comportamiento distinto frente a cambios de sitio, siendo el único clon de mayor volumen en la Peña que en Santa Julia, igual tendencia mostró en rendimiento pulpable, no obstante en este último caso la interacción clon × sitio resultó no significativa (figura 2).

Relación entre variables. Las correlaciones entre volumen y densidad y entre volumen y rendimiento pulpable resultaron no significativas ($P > 0,05$), a excepción de la correlación entre volumen y rendimiento pulpable en La Peña que resultó ser estadísticamente significativa ($P < 0,05$) y de tendencia positiva. Sin embargo, este último resultado debe tomarse con cautela por cuanto la tendencia está fuertemente influenciada por el clon 110, faltando un mayor número de casos entre los extremos (figura 3). En este sentido, considerando solo los clones 36, 47 y 57 la correlación entre volumen y rendimiento pulpable no es significativa (correlación de 0,141; $P = 0,6626$), como tampoco lo es en el clon 110 (correlación de 0,300; $P = 0,7004$). Las correlaciones entre densidad y rendimiento pulpable fueron positivas siendo solo estadísticamente significativa en Santa Julia (figura 3).

DISCUSIÓN

Variación de la densidad en el sentido longitudinal. Si bien el perfil de variación de la densidad en el sentido longitudinal en los dos clones analizados coincide con lo reportado en la literatura, es decir, de tendencia creciente desde la base al ápice (Downes *et al.* 1997, Raymond y Muneri 2001, Igartúa *et al.* 2002, Schimleck *et al.* 2006), es evidente que los dos clones tienen distinto perfil de variación. No obstante ser dos clones de distinta edad, presentan una densidad similar al DAP y al 20 % de altura y desde el 40 % de altura hacia



Factores	Volumen	Densidad básica	Rendimiento pulpable
Clon (<i>P</i>)	<0,0001 ***	0,2754 ns	0,9832 ns
Sitio (<i>P</i>)	0,0004 ***	0,0474 *	0,0093 **
Clon x sitio (<i>P</i>)	0,0001 ***	0,9232 ns	0,0861 ns

Figura 2. Rendimiento relativo de cada clon de *Eucalyptus globulus* por ensayo para los valores de: A) volumen, B) densidad básica y C) rendimiento pulpable. Ensayo La Peña (11 años de edad) y ensayo Santa Julia (10 años de edad). *P*: probabilidades límites en ANDEVA con dos factores. *: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$; ***: $P < 0,001$; ns: no significativo. Letras diferentes sobre cada barra indican diferencias significativas entre diferentes clones para el ensayo La Peña y letras diferentes dentro de cada barra indican diferencias significativas entre diferentes clones para el ensayo Santa Julia (Duncan, $P < 0,05$).

Relative yield of each *Eucalyptus globulus* clone by trial for the values of: A) volume, B) basic density and C) pulp yield. La Peña trial (11 years old) and Santa Julia trial (10 years old). *P*: probability limits, two-factor ANOVA. *: $P < 0,05$, **: $P < 0,01$, ***: $P < 0,001$, ns = not significant. Different letters above each bar indicate significant differences between different clones for La Peña trial and different letters within each bar indicate significant differences between different clones for Santa Julia trial.

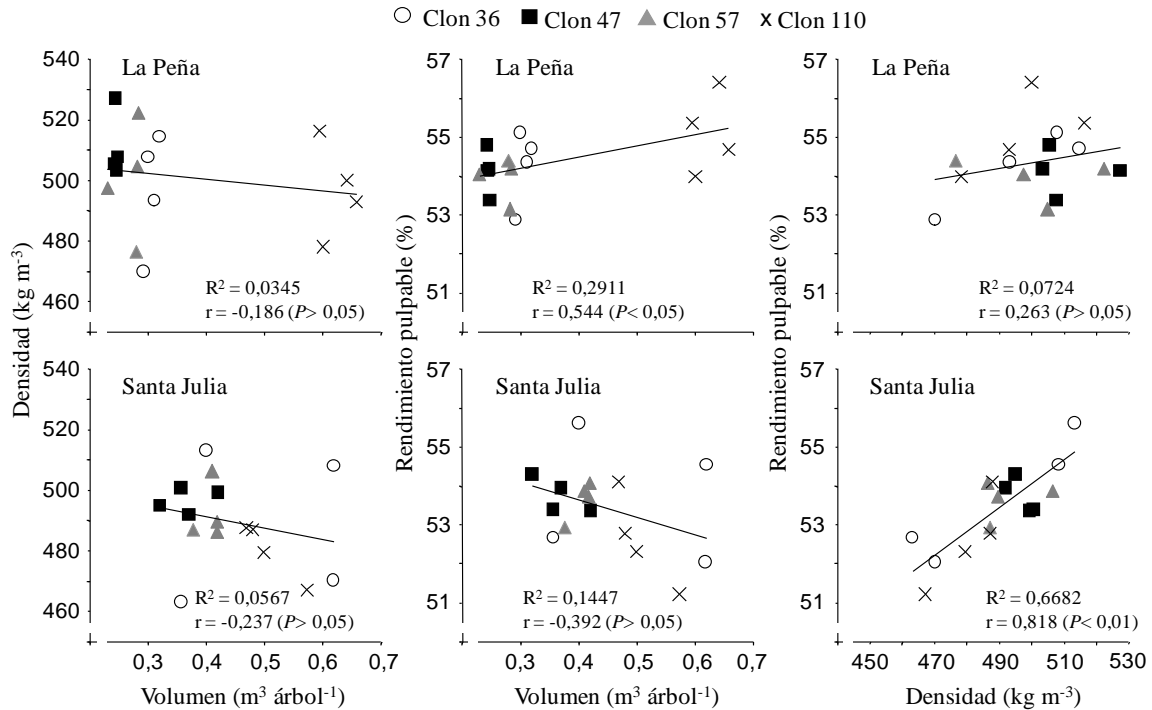


Figura 3. Relación entre volumen, densidad y rendimiento pulparable de clones de *Eucalyptus globulus* en los ensayos La Peña (11 años de edad) y Santa Julia (10 años de edad).

Relation among volume, basic density and pulp yield of *Eucalyptus globulus* clones in the trial La Peña (11 years old) and Santa Julia (10 years old).

arriba los valores son, en su mayoría, estadísticamente diferentes. Este perfil de variación diferente desde el 40 % de la altura hacia arriba tiene como resultado una densidad promedio del fuste diferente entre ambos clones. A su vez, este diferente perfil de variación provoca que el punto de mejor representación de densidad se ubique al 20 % de altura en el clon 110 y a la altura del DAP en el clon 36, lo cual parece lógico por cuanto un árbol con mayor aumento de densidad en el sentido longitudinal del fuste, deberá tener también su punto de mejor representación a una altura mayor, mientras que un árbol con menor incremento de densidad en el sentido longitudinal del fuste, deberá tener su punto de mejor representación más cercano a la base. Al respecto, en ninguno de los dos clones la altura de mejor representación de densidad coincidió con lo reportado para esta especie por Downes *et al.* (1997) quienes lo fijan en un 40 % de la altura comercial. Los resultados obtenidos en este estudio, son más consistentes que los obtenidos por Raymond y Muneri (2001), quienes determinan que la mejor correlación entre tarugos y densidad del árbol completo, se obtiene con muestras de tarugos obtenidas a alturas entre 1,1 y 1,5 m.

Desde un punto de vista práctico, los resultados anteriores indican que medidas efectuadas sólo al DAP pueden significar un error de selección importante en un programa de mejoramiento genético. De acuerdo a lo anterior, sería recomendable que frente a un programa de selección

clonal y con el objetivo de validar la información determinada mediante espectroscopía de infrarrojo cercano, se realice un análisis destructivo con la metodología de Peredo *et al.* (2006) para confirmar, en especial, los valores de los clones seleccionados en el área de corte, es decir, los últimos clones seleccionados del ranking de los mejores y los primeros clones del ranking de los descartados. Esta recomendación debe ser especialmente considerada, por cuanto se puede apreciar que existe alta consistencia en los perfiles de variación de los rametos de cada clon (figura 1B). Esto también concuerda con Burdon y Libby (2006) en el sentido de que los rasgos y las características de crecimiento son relativamente más homogéneos en los rametos de un mismo clon. Ahora, considerando que los resultados de los perfiles de variación fueron determinados solamente en dos clones y que además se encontraban en sitios distintos, es recomendable verificar este comportamiento realizando un estudio similar con un número mayor de clones ubicados en un mismo sitio.

Respecto de las predicciones de densidad con espectroscopía de infrarrojo cercano, éstas arrojaron un error estándar de predicción de 28,5 kg m⁻³ en el clon 110 y de 23,2 kg m⁻³ en el clon 36, lo cual es mayor al error estándar de predicción de 14,3 kg m⁻³ reportado en Chile por Ruiz *et al.* (2005) para esta especie. Este menor error se puede explicar por cuanto Ruiz *et al.* (2005) usaron un modelo de

ajuste local, a diferencia del presente estudio que uso una función ajustada para una variedad de sitios. Los estudios de Schimleck *et al.* (1999) y Schimleck y French (2002) reportan para *E. globulus* errores estándar de predicción superiores, con valores de 30 kg m^{-3} y $28,8 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente. En estos estudios los modelos predictivos empleados, al igual que en este estudio, se ajustaron con datos provenientes de una variedad de sitios, lo que genera un mayor error respecto a los modelos ajustados para un sitio en particular (Schimleck *et al.* 2000, Schimleck 2007).

Respecto de las predicciones de rendimiento pulpable con espectroscopía de infrarrojo cercano, los errores estándar de predicción obtenidos (2,2 % en el clon 110 y 2,0 % en el clon 36) son superiores a lo registrado en la literatura para *E. globulus* con rango entre 0,64 % a 1,57 % (Schimleck *et al.* 2000, Schimleck y French 2002, Ruiz *et al.* 2005). No obstante, los errores estándar de predicción obtenidos son inferiores a los de Schimleck *et al.* (2005) quienes reportaron para *Eucalyptus nitens* Deane *et Maiden* un error estándar de predicción de 4,6 % obtenido al utilizar un modelo ajustado para otra condición de sitio.

Por otra parte, el sesgo entre las mediciones de astillas y las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano fueron muy bajos (0,1 % de diferencia en ambos clones). Para la densidad el sesgo fue de $17,2 \text{ kg m}^{-3}$ en el clon 110 y de $10,7 \text{ kg m}^{-3}$ en el clon 36. En todos los casos, los valores de sesgo de estas predicciones estuvo dentro del rango de error para promedios familiares descrito por Raymond *et al.* (2001b) y Raymond (2002) ($\pm 20 \text{ kg m}^{-3}$ para la densidad y de $\pm 1 \%$ para rendimiento pulpable), se debe considerar además que ambos autores señalan que estos errores se logran con el muestreo de ocho y seis árboles por familia, respectivamente.

Todo lo anterior indica que las predicciones con espectroscopía de infrarrojo cercano de densidad y rendimiento pulpable presentaron un error acorde a lo descrito en la literatura, igualmente se puede señalar que las predicciones de rendimiento pulpable tuvieron una precisión especialmente alta. Además, en todos los casos anteriores las predicciones mediante espectroscopía de infrarrojo cercano subestimaron los valores de densidad y rendimiento pulpable (cuadro 2), lo cual puede ser atribuido a un problema de ajuste del modelo para la zona.

Variación entre clones y sitio. Santa Julia presentó un mayor volumen que La Peña, no obstante este último es un año mayor, siendo ello atribuido a las mejores condiciones de suelo de Santa Julia. Esta diferencia de edad junto a un mayor espaciamiento entre árboles puede explicar que en La Peña exista una mayor densidad y rendimiento pulpable respecto a Santa Julia, puesto que ambas propiedades de la madera tienden a aumentar con la edad, además, la densidad también tiende a aumentar a mayor espaciamiento entre árboles (Downes *et al.* 1997, Raymond 2002, Peredo *et al.* 2006).

Las diferencias de densidad y rendimiento pulpable entre clones resultaron no ser significativas dentro de cada

ensayo, mientras que las diferencias de volumen resultaron ser altamente significativas. Respecto de la densidad este resultado difiere de lo encontrado por Lima *et al.* (2000) y Chen (2006) y respecto del rendimiento pulpable concuerda a lo encontrado por Chen (2006).

El número de clones evaluados no permite obtener una conclusión sólida en cuanto a interacción genotipo \times ambiente. Sin embargo, el comportamiento en crecimiento del clon 110 podría interpretarse como un indicador de interacción genotipo \times ambiente, ello por cuanto presenta un significativo mejor volumen en el ensayo La Peña respecto a los demás clones, mientras que todos los demás clones tienen mejor volumen en el ensayo Santa Julia. Por otra parte, la densidad y rendimiento pulpable no parecen presentar interacción genotipo \times ambiente. Todo lo anterior concuerda con lo señalado por Zobel y Talbert (1992), en el sentido que las propiedades de la madera en general no presentan interacción genotipo \times ambiente, pero discrepa con lo reportado por McDonald *et al.* (1997) y Costa *et al.* (2004, 2009), los que señalan que el crecimiento en esta especie también suele tener una moderada a baja interacción genotipo \times ambiente.

Las correlaciones entre variables de crecimiento y densidad o rendimiento pulpable encontradas en este estudio coinciden a lo reportado en la literatura, es decir, una correlación no significativa (Raymond *et al.* 2001a, Raymond y Schimleck 2002, Apiolaza *et al.* 2005, Espina 2006). Del mismo modo, las correlaciones entre densidad y rendimiento pulpable encontradas en ambos ensayos también son coincidentes con lo reportado en otros estudios (Raymond *et al.* 2001a, Raymond y Schimleck 2002, Apiolaza *et al.* 2005).

CONCLUSIONES

Los clones pueden tener distinto perfil de variación de la densidad en el sentido de la altura de los árboles. Esto puede significar que clones con densidades similares a la altura del DAP pueden tener diferencias significativas en su densidad promedio del fuste.

A pesar de usar un modelo de predicción mediante espectroscopía de infrarrojo cercano desarrollado para una variedad de sitios, las predicciones arrojaron un error inferior al rango descrito para *E. globulus*, siendo especialmente precisas las predicciones de rendimiento pulpable.

La densidad y rendimiento pulpable, para el grupo de clones estudiados, presenta baja variabilidad y baja interacción con el sitio. Para el volumen existe una alta variabilidad entre clones y una alta interacción con el sitio.

AGRADECIMIENTOS

A la Sra. Isabel Oñate, Gerente de Forestal Probosque Ltda., por facilitar los ensayos clonales y apoyo logístico para realizar el muestreo y obtención de astillas. A Bioforest S.A., en cuyo laboratorio fueron realizadas las deter-

minaciones con espectroscopía de infrarrojo cercano. Al laboratorio de pulpa y papel de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales de la Universidad Austral de Chile, en donde se realizaron los ensayos pulpables.

REFERENCIAS

- Apiolaza L, CA Raymond, B Yeo. 2005. Genetic variation of physical and chemical wood properties of *Eucalyptus globulus*. *Silvae Genetica* 54: 160-166.
- Baillères H, F Davrieux, F Ham-Pichavant. 2002. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. *Annals of Forest Science* 59: 479-490.
- Burdon R, W Libby. 2006. Genetically Modified forests from Stone Age to modern biotechnology. USA. Forest History Society issues series. 79 p.
- Chen Y. 2006. Variation of wood basic density, pulp yield and other wood properties for four eucalyptus clones in Stora Enso Guangxi (China) plantation. MSc thesis of Programmes in Wood Engineering. Sweden. Luleå University of Technology. 51 p.
- Costa e Silva J, NM Borralho, BM Potts. 2004. Additive and non-additive genetic parameters from clonally replicated and seedling progenies of *Eucalyptus globulus*. *Theoretical and Applied Genetics* 108: 1113-1119.
- Costa e Silva J, NM Borralho, JA Araújo, RE Vaillancourt, BM Potts. 2009. Genetic parameters for growth, wood density and pulp yield in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* 5: 291-305.
- Donoso C. 1992. Ecología Forestal. El bosque y su medio ambiente. 5ª edición. Santiago, Chile. Universitaria. 369 p.
- Downes G, I Hudson, CA Raymond, G Dean, A Michell, LR Schimleck, R Evans, A Muneri. 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties. Australia. CSIRO publishing. 124 p.
- Droppelmann F, C De Veer, E Morales, C Balocchi, E Pérez, P Crespell. 2002. Catálogo de valores genéticos *Pinus radiata*. Valdivia, Chile. Cooperativa de mejoramiento genético forestal UACH, CONAF, INFOR y Empresas forestales. 83 p.
- Espina A. 2006. Densidad básica de la madera de *Eucalyptus globulus* en dos sitios en Chile. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 25 p.
- Igartúa D, S Rivera, M Monterubbianesi, S Monteoliva, M Villegas. 2002. Calidad del leño en *Eucalyptus globulus ssp. globulus*. II. Variación de la densidad básica y el largo de fibra en Lobería, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía* 105(1): 29-39.
- Lima JT, MC Breese, CM Cahalan. 2000. Genotype-environment interaction in wood Basic density of *Eucalyptus* clones. *Wood Science and Technology* 34: 197-206.
- McDonald AC, NM Borralho, BM Potts. 1997. Genetic variation for growth and wood density in *Eucalyptus globulus ssp. globulus* in Tasmania (Australia). *Silvae Genetica* 46: 236-241.
- Morales EH. 2005. Diseño experimental a través del análisis de varianza y modelo de regresión lineal. Santiago, Chile. Andros. 248 p.
- Peredo M. 1999. Aptitud pulpable de *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* y *E. regnans* cultivados en Chile. Concepción, Chile. In XII Silvotecnica, Realidad y Potencial del *Eucalyptus* en Chile, Concepción. 18 p.
- Peredo M, C Mora, M Ramírez. 2006. Efecto del espaciamiento en la densidad básica y aptitud pulpable de la madera de *Eucalyptus nitens*. 8 p. Consultado 10 jul. 2008. Disponible en <http://www.celuloseonline.com.br/imagembank/Docs>.
- Raymond CA, A Muneri. 2001. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. I. Basic density. *Wood Science and Technology* 35: 27-39.
- Raymond CA, LR Schimleck, A Muneri, AJ Michell. 2001a. Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for pulp-yield predicted using near infrared reflectance analysis and pulp productivity in *Eucalyptus globulus*. *International Journal of Forest Genetics* 8(3): 213-224.
- Raymond CA, LR Schimleck, L Muneri, AJ Michell. 2001b. Non-destructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. III Predicted pulp yield using near infrared reflectance analysis. *Wood Science and Technology* 35: 203-215.
- Raymond CA. 2002. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. *Annals of Forest Science* 59: 525-531.
- Raymond CA, LR Schimleck. 2002. Development of near infrared reflectance analysis calibrations for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 170-176.
- Ruiz J, J Rodriguez, J Baeza. 2005. Estimating density and pulp yield of *E. globules* wood: comparison of Near-infrared (NIR) and Mid-infrared (MIR). *Journal of Chilean Chemical Society* 50(3): 565-568.
- Schimleck LR, AJ Michell, CA Raymond, A Muneri. 1999. Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 194-201.
- Schimleck LR, CA Raymond, C Beadle, G Downes, P Kube, J French. 2000. Applications of NIR spectroscopy to forest research. *Appita* 53(6): 458-464.
- Schimleck LR, R Evans, J Ilic. 2001. Application of near infrared spectroscopy to a diverse range of species demonstrating wide density and stiffness variation. *IAWA Journal* 22(4): 415-429.
- Schimleck LR, J French. 2002. Application of NIR spectroscopy to clonal *Eucalyptus globulus* simples cover in a narrow range of pulp yield. *Appita* 55(2): 149-154.
- Schimleck LR, P Kube, CA Raymond, AJ Michell, J French. 2005. Estimation of whole-tree kraft pulp yield of *Eucalyptus nitens* using near infrared spectra collected from increment cores. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2797-2805.
- Schimleck LR, G Rezende, B Bemuner, G Downes. 2006. Estimation of whole tree wood quality traits using near infrared spectra from increment cores. *Appita* 59 (3): 231-236.
- Schimleck LR. 2007. Near infrared spectroscopy: a rapid, non-destructive method for measuring wood properties and its application to tree breeding. Manuscript submitted to the New Zealand Journal of Forestry Science based on a presentation given by the author at the Inaugural Australasian Forest Genetics Conference. Australia. 35 p.
- Schlatter JE, V Gerding, J Adriazola. 1994. Sistema de ordenamiento de la tierra; herramienta para la planificación forestal. Aplicado a las Regiones VII, VIII, IX. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 120 p.

Skoog D, J Leary. 1994. Espectroscopía de absorción en el infrarrojo. In Skoog D, J Leary eds. Análisis instrumental. España. McGraw - Hill. p. 296-338.

Tosso J. 1985. Suelos Volcánicos de Chile. Santiago, Chile. Mi-

nisterio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 723 p.

Zobel BJ, JT Talbert. 1992. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. North Carolina, USA. Limusa. 545 p.

Recibido: 13.06.12
Aceptado: 17.07.13