

Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus* en un ensayo Nelder modificado

P. Ferrere^{1*}, G. A. López^{1,2}, R. T. Boca^{3,4}, M. A. Galetti⁵,
C. A. Esparrach⁵ y P. S. Pathauer¹

¹ Instituto de Recursos Biológicos. CIRN. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
Los Reseros y Las Cabañas, s/n. CP 1712 Castelar (BA). Argentina

² Centro de Investigación y Tecnología de ENCE. Ctra. Madrid-Huelva, km 630.
Apdo. 223. 21880 Huelva. España

³ Instituto de Clima y Agua. CIRN. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
Los Reseros y Las Cabañas, s/n. CP 1712 Castelar (BA). Argentina

⁴ Cátedra de Métodos Cuantitativos Aplicados. Facultad de Agronomía. UBA

⁵ EEA INTA Balcarce. CC 276. CP 7629 Balcarce (BA). Argentina

Resumen

Se examinó el efecto de la densidad inicial de plantación de *Eucalyptus globulus* sobre variables de crecimiento en un ensayo instalado en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Variables de diámetro, altura total, área basal, espesor relativo de corteza y densidad de la madera, se estudiaron en un período de 10 años y se evaluaron en relación a 9 densidades iniciales de plantación siguiendo un diseño de tipo Nelder modificado. Las densidades ensayadas variaron entre 2.083 y 582 plantas/ha. Al disminuir la densidad de plantación hasta el tratamiento de 761 plantas/ha, aumentó el crecimiento en diámetro y, en menor medida, en altura. El área basal fue mayor en los tratamientos intermedios. Al sexto año se encontraron diferencias significativas en la densidad de madera entre los tratamientos estudiados. No se detectaron diferencias en la proporción de corteza en relación al diámetro. Se concluye que la densidad de plantación 1.095 plantas/ha optimiza un buen crecimiento individual y de rodal.

Palabras clave: densidad inicial, *Eucalyptus globulus*, diseño Nelder, crecimiento.

Abstract

Initial density effect on *Eucalyptus globulus* growth in a Nelder modified trial

The effect of initial planting density on the growth and wood density of *Eucalyptus globulus* was examined in a trial established in the southeast of Buenos Aires Province, Argentina. A modified Nelder design was used to generate 9 planting densities ranging from 582 to 2.083 trees/ha.

The effect of planting density on diameter at breast height, total tree height, basal area, relative bark thickness and wood density was studied over a 10-year period. By reducing the initial density of planting to 761 trees/ha, an increase on individual tree growth was observed, principally on diameter and to a lesser extent on tree height. However, basal area (m²/ha) was greatest at intermediate densities. Initial planting density affected wood basic density at 6 years of age but not relative bark thickness. In conclusion, 1,095 trees/ha was found to be the best initial density to optimize individual and stand growth.

Key words: initial stocking, *Eucalyptus globulus*, Nelder design, growth.

Introducción

Eucalyptus globulus L. es la mejor especie maderera destinada a la fabricación de papel y se estima que existen más de 2,5 millones de hectáreas plantadas en re-

giones templadas del mundo (Potts *et al.*, 2004). La especie es nativa de Tasmania y el sudeste de Australia, entre los 38° 30' y los 43° 30' de latitud sur, desde el nivel del mar hasta los 450 m (Brooker y Kleinig, 1990). En Argentina, *E. globulus* encuentra su óptimo de adaptación ecológica en la franja costera del sudeste de la provincia de Buenos Aires con una aptitud potencial estimada en unas 850.000 hectáreas (Culot, 2000; Moschini

* Autor para la correspondencia: pferrere@cni.inta.gov.ar
Recibido: 10-03-04; Aceptado: 27-04-05.

et al., 2000). En esta zona ofrece altos crecimientos volumétricos (Pathauer *et al.*, 2003) y se está desarrollando un programa de mejoramiento genético para aumentar aun más la producción, tanto en cantidad como en calidad (Rodríguez Traverso, 2000; López *et al.*, 2002).

Complementariamente a estos trabajos tendientes a maximizar la producción, es necesario encontrar un esquema de manejo silvícola que permita expresar el potencial de crecimiento de los materiales genéticamente mejorados para las condiciones de sitio específicos. En este sentido, la densidad de plantación ha sido identificada como uno de los principales factores determinantes de la productividad forestal (Daniel *et al.*, 1982). En rotaciones cortas y sin raleos, la densidad inicial de plantación constituye una importante decisión en el manejo forestal, afectando el volumen del rodal, el tamaño de las trozas y el turno de corta, lo que traerá por ende implicancias económicas (Coetzee, 1991).

En general, el aumento de la densidad de plantación afecta al crecimiento individual de los árboles manifestándose por una disminución en el diámetro y altura, pero contrastándose por un aumento de la biomasa total por hectárea. Estas tendencias han sido reportadas para *Eucalyptus* (Shönau y Coetzee, 1989; Bernardo *et al.*, 1998) y específicamente en *E. camaldulensis* y *E. tereticornis* (Mushove, 1991), *E. grandis* (Coetzee, 1991; Dalla-Tea, 1995), *E. nitens* (Nielsen y Gerrand, 1999) y *E. globulus* (Madrigal *et al.*, 1999; Pinilla Suárez y Ulloa, 2001). Sin embargo, el punto de compromiso para conseguir el máximo de producción maderera puede estar condicionado no solo por la especie sino también por el sitio (Coetzee, 1991; Madrigal *et al.*, 1999), incluso más concretamente por la preparación del sitio, tal como menciona Mushove (1991).

El objetivo del presente trabajo es estudiar los efectos de la densidad inicial de plantación sobre distintas componentes del crecimiento de *E. globulus* en la zona de mayor concentración de forestaciones con esta especie en Argentina, así como también el efecto sobre la densidad de la madera y el espesor de corteza, características ambas de importancia en la productividad forestal.

Material y Métodos

Sitio y diseño

El ensayo se instaló en 1993 dentro de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Balcarce, en el

sudeste de la provincia de Buenos Aires, geográficamente ubicada en 37° 45' latitud sur y 58° 17' longitud oeste a 133 m.s.n.m. La precipitación media anual del sitio es de 908 mm distribuida uniformemente a lo largo del año, la temperatura media anual de 13,5° C y la mínima absoluta registrada de -5,4° C (López *et al.*, 2001). Las plantas utilizadas fueron producidas en maceta con semilla comercial de procedencia chilena en un vivero de la zona. Con un laboreo previo del terreno, se instaló el ensayo en septiembre y se repuso al 100% en noviembre de ese mismo año, ya que fue afectado severamente por heladas tardías.

Se utilizó un diseño sistemático tipo Nelder (1962) modificado, donde por motivos de mantenimiento y control de malezas la distancia que separa los radios es paralela y constante de 3 metros transformándose en una fila de plantación. La distancia entre plantas posee un incremento de un 20% respecto de la planta anterior, comenzando con una distancia de 1,6 metros. Al momento de la plantación los individuos de ensayo totalizaban 380 árboles, además de los bordes internos y externos. La superficie total del ensayo fue de 4282,47 m² (Figura 1).

El empleo de este tipo de diseños es útil para evaluar tendencias en una amplia gama de tratamientos en una reducida superficie de terreno, lo que implica una disminución substancial de los costos totales, además de la simplificación de tareas de manejo y de permitir una visualización integral del ensayo (García, 1994). Por tratarse de parcelas de un solo árbol tienen la desventaja de verse afectados por la muerte o daño de un ejemplar (Nelder, 1962), no pudiéndose evaluar mortalidad por competencia. Pero desde el punto de vista operativo permiten obtener resultados confiables en una pequeña superficie de terreno.

Tratamientos y variables observadas

El rango de densidades experimentadas varió entre 2.083 y 582 plantas/ha con un total de 9 tratamientos (Tabla 1). La rectangularidad se encuentra en un rango de entre 1 y 1,90, pero dicha variable no fue tenida en cuenta en el presente análisis como factor de variación, en virtud de lo expresado por Gerrand y Nielsen (2000), que categóricamente no detectaron diferencias sobre el crecimiento en el uso de espaciamientos rectangulares.

Se midió altura total (*h*) de todos los árboles en m desde el año 1 al año 10, en tanto que para el diáme-

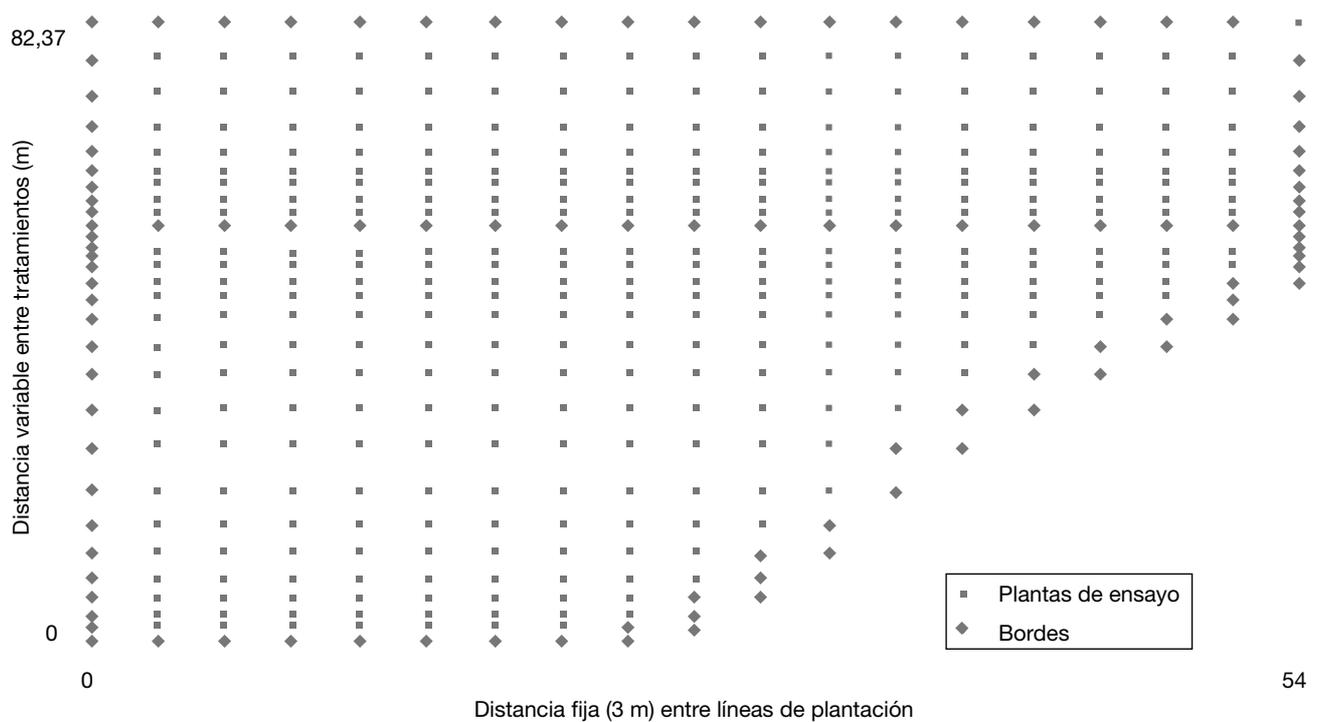


Figura 1. Croquis del ensayo de densidad inicial de plantación.

tro normal (d), medido en mm, las observaciones se tomaron a partir del tercer año de implantación. A los 6 años de edad, se midió penetración con Pilodyn en mm en los distintos tratamientos, siguiendo la metodología descrita por Gelid *et al.* (2001). Se realizó la observación en dicha edad debido a que la variable se considera estabilizada ya a partir de los cuatro años (Gelid *et al.*, 2001). La penetración de Pilodyn es una medida indirecta de la densidad básica de la madera (dm) por estar inversamente relacionadas (Greaves *et al.*, 1996). A tal efecto se midieron todos los árboles utilizándose para la determinación de la densidad, la

relación propuesta en Ferrere *et al.* (2003). Con el mismo instrumento y en la misma operación se midió espesor de corteza en mm.

Análisis estadístico

Formaron parte del análisis todos los árboles vivos, extrayéndose del mismo aquellas observaciones provenientes de individuos dominados, marras o reposiciones oprimidas, y las de sus 8 vecinos. El número final de árboles por tratamiento figura en la Tabla 1. La

Tabla 1. Detalle de los espaciamientos ensayados, número de tratamiento asignado y equivalente de densidad de plantación inicial

Tratamiento	Distancia entre plantas	Distancia al origen	Superficie/ árbol	Árboles por tratamiento	Densidad/ha
1	1,60	1,60	4,80	17	2.083
2	1,60	3,20	5,28	41	1.894
3	1,92	5,12	6,34	38	1.580
4	2,30	7,42	7,60	43	1.315
5	2,76	10,19	9,12	43	1.095
6	3,32	13,51	10,95	43	913
7	3,98	17,49	13,14	44	761
8	4,78	22,27	15,77	44	634
9	5,73	28,00	17,19	27	582

tasa de mortalidad fue muy baja. Se estimó área basal (g) en m^2/ha , a partir del d , multiplicándolo por la densidad del tratamiento. Nótese que el área basal está en realidad levemente sobreestimada, ya que en la práctica es casi imposible alcanzar una supervivencia del 100% en plantaciones comerciales. También se calculó la proporción de corteza (pc) como el cociente entre espesor de corteza y diámetro.

Las variables, diámetro (d), altura (h) y área basal (g), han sido medidas sobre la misma unidad experimental a través de tiempo. Es razonable que los sujetos (árboles) sean asumidos independientes, aunque las medidas tomadas sobre un mismo sujeto pueden estar correlacionadas. Además el diseño es desequilibrado, debido al número desigual de observaciones por tratamiento, por lo tanto se utilizó un modelo mixto para medidas repetidas (Littell *et al.*, 1996).

Sea y_{ijk} la variable observada repetida sobre la i -ésima densidad, del j -ésimo año y el k -ésimo sujeto (árbol). El modelo se puede escribir como:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + d_{ij} + \tau_k + (\alpha\tau)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

donde μ , α_i , τ_k y $(\alpha\tau)_{ik}$ son los efectos fijos, media, efectos de densidad, efecto de año e interacción (año \times densidad) respectivamente. d_{ij} es el efecto aleatorio asociado al j -ésimo sujeto en la densidad i , con distribución Normal Multivariada $(0, \tau_{ij}^2 I)$, ε_{ijk} es el error aleatorio asociado al sujeto medido en la i -ésima densidad, del j -ésimo año y el k -ésimo sujeto (árbol) con distribución Normal Multivariada $(0, \sigma_{ijk}^2 I)$. La covarianza entre dos observaciones es σ_{ijk}^2 , lo que determina una matriz de varianza y covarianza con una estructura de simetría compuesta. El procesamiento de los datos se realizó con el procedimiento PROC MIXED de SAS®.

El análisis estadístico de la densidad de madera y espesor de corteza se realizaron utilizando un modelo lineal univariado de efectos fijos, aplicando el procedimiento GLM de SAS®, ya que solo se registró el valor de las variables a los 6 años de edad.

Se realizaron pruebas estadísticas para los efectos fijos, densidad y año, utilizando la prueba F de PROC MIXED de SAS.

Resultados

Diámetro

Los resultados para la variable diámetro mostraron que la interacción entre las densidades y la edad era

significativa ($p < 0,0001$). Por lo tanto se realizó el análisis dentro de cada año, encontrándose diferencias significativas entre las densidades en todos los años. Las densidades que muestran diferencias significativas en los diámetros, dentro de cada año, se muestran en la Tabla 2. Dichas diferencias fueron detectadas desde el inicio de las mediciones. A partir del cuarto año de plantado, los tratamientos evidencian una leve tendencia a dividirse en tres grupos (Figura 2). En el primer grupo, se ubican los tratamientos con densidades superiores a las 1.800 plantas/ha (2.083 y 1.894 plantas/ha) y muestran menor crecimiento. Dichos tratamientos no evidencian diferencias significativas entre sí, pero crecieron significativamente menos que el resto de los tratamientos a lo largo de todo el ciclo estudiado. En el segundo grupo se encuentran los tratamientos de 1.300 a 1.600 plantas/ha (1.315 y 1.580) que tampoco muestran diferencias significativas entre sí. Finalmente el resto de los tratamientos (densidades menores a 1.200 plantas/ha), mostraron un crecimiento superior y significativamente distinto. Las densidades menores a 913 plantas/ha no mostraron diferencias significativas a lo largo de todo el período estudiado. Este grupo de tratamientos creció significativamente más que la densidad de 1.095 plantas/ha, pero las diferencias de crecimiento al año 10, fueron solo de 2,5 cm.

Entre el 5° y 6° año se observa una marcada disminución del crecimiento en diámetro. Este fenómeno se atribuye probablemente a la baja precipitación registrada durante este año particularmente seco, donde las precipitaciones disminuyeron aproximadamente un 50% en relación a la media del período evaluado (Figura 3). Para el décimo año, las diferencias de crecimiento en diámetro era del 57 % a favor de 761 plantas/ha, en relación al tratamiento de 2.083 plantas/ha.

El menor diámetro promedio se registró en la densidad de 1.894 plantas/ha y fue de 12,83 cm, en tanto que el mayor diámetro promedio fue de 22,35 cm en la densidad de 761 plantas/ha.

Altura

El análisis de efectos fijos para la variable altura se realizó con el mismo procedimiento que para la variable anterior. También se detectó que la interacción era significativa entre las densidades y las fechas ($p < 0,0001$). Por lo tanto se realizó el análisis dentro de cada año, encontrándose diferencias significativas

Tabla 2. Pruebas de comparaciones múltiples para efecto densidad sobre el diámetro dentro de cada edad

Densidad		Edad								
Trat. vs. trat.		3	4	5	6	7	8	9	10	
582	634	-0,1645 NS	-0,03355 NS	0,02598 NS	0,03052 NS	-0,2378 NS	-0,3191 NS	-0,3861 NS	-0,2231 NS	
	761	-0,9788 NS	-0,5002 NS	-0,3550 NS	-0,2103 NS	-0,5020 NS	-0,6195 NS	-0,6903 NS	-0,5564 S	
	913	-0,7799 NS	0,1624 NS	0,4676 NS	0,7495 NS	0,6776 NS	0,9019 NS	1,1296 NS	1,2858 NS	
	1.095	-0,4471 NS	0,6725 NS	1,4935 NS	1,9860*	1,9019*	2,1427*	2,2329*	2,5281**	
	1.315	0,4688 NS	2,0522*	2,9688**	3,3227**	4,0397**	4,3497**	4,9749**	5,4797**	
	1.580		2,6225**	3,8022**	4,3438**	4,8664**	5,2851**	5,8624**	6,3707**	
	1.894	1,9081*	3,8889**	5,1517**	5,7533**	6,8140**	7,4701**	8,1090**	8,7194**	
	2.083				6,5316**	7,4124**	8,0029**	8,4995**	8,8987**	
634	761		-0,4667 NS		-0,2408 NS	-0,2642 NS	-0,3004 NS	-0,3042 NS	-0,3334 NS	
	913	-0,6154 NS	0,1960 NS	0,4416 NS	0,7189 NS	0,9154 NS	1,2210 NS	1,5157 NS	1,5089 NS	
	1.095	-0,2826 NS	0,7060 NS	1,4675*	1,9555*	2,1397**	2,4618**	2,6190**	2,7512**	
	1.315	0,6333 NS	2,0857*	2,9429**	3,2921**	4,2775**	4,6688**	5,3611**	5,7028**	
	1.580	1,3889*	2,6561**	3,7762**	4,3133**	5,1042**	5,6042**	6,2485**	6,5938**	
	1.894	2,0726**	3,9224**	5,1257**	5,7228**	7,0517**	7,7892**	8,4951**	8,9424**	
	2.083				6,5010**	7,6501**	8,3220**	8,8856**	9,1218**	
	761	913	0,1989 NS	0,6626 NS	0,8225 NS	0,9597 NS	1,1796 NS	1,5214 NS	1,8199 NS	1,8422 NS
1.095		0,5317 NS	1,1727 NS	1,8484*	2,1963**	2,4039**	2,7622**	2,9233**	3,0846**	
1.315		1,4476 NS	2,5524**	3,3238**	3,5330**	4,5417**	4,9692**	5,6653**	6,0362**	
1.580		2,2032**	3,1228**	4,1571**	4,5541**	5,3684**	5,9046**	6,5527**	6,9271**	
1.894		2,8869**	4,3891**	5,5067**	5,9636**	7,3159**	8,0896**	8,7993**	9,2758**	
2.083					6,7418**	7,9143**	8,6224**	9,1898**	9,4551**	
913		1.095	0,3328 NS	0,5100 NS		1,2365 NS	1,2243 NS	1,2408 NS	1,1033 NS	1,2423 NS
		1.315	1,2487 NS	1,8897*	2,5013**	2,5732**	3,3621**	3,4478**	3,8453**	4,1939**
	1.580	2,0043 NS	2,4601*		3,5943**	4,1888**	4,3832**	4,7328**	5,0849**	
	1.894	2,6880**	3,7265**	4,6841**	5,0039**	6,1364**	6,5682**	6,9794**	7,4336**	
	2.083						7,1010**		7,6129**	
1.095	1.315		1,3797 NS	1,4754 NS	1,3367 NS	2,1378*	2,2070**	2,7420*	2,9516**	
	1.580	1,6715*	1,9501*	2,3087**	2,3578**	2,9645**	3,1424**	3,6295**	3,8426**	
	1.894	2,3552**	3,2164**	3,6582**	3,7673**	4,9121**	5,3274**	5,8761**	6,1912**	
	2.083					5,5104**	5,8602**	6,2666**	6,3706*	
1.315	1.580	0,7556 NS	0,5704 NS	0,8333 NS	1,0211 NS	0,8267 NS	0,9354 NS	0,8875 NS	0,8910 NS	
	1.894	1,4393 NS	1,8367*	2,1829**	2,4307**	2,7742**	3,1204**			
	2.083				3,2089**	3,3726**	3,6532**	3,5245**	3,4189**	
1.580	1.894	0,6837 NS	1,2663 NS	1,3495 NS	1,4096 NS	1,9476*	2,1850**	2,2466**	2,3487**	
	2.083				2,1878 NS	2,5460*	2,7178*	2,6371*	2,5280*	
1.894	2.083				0,7782 NS	0,5984 NS	0,5328 NS	0,3905 NS	0,1793 NS	

NS: no se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 5%. * Se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 5%. ** Se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 1%.

para las alturas en las densidades a partir del sexto año. Las densidades que mostraron diferencias significativas dentro de los años 6 al 10 se muestran en la Tabla 3.

Del análisis realizado, se desprende que las diferencias de crecimiento no fueron tan evidentes como en el caso del diámetro. En general se observó que la altura aumentó con la disminución de la densidad hasta el tratamiento de 761 plantas/ha (Figura 4). No se

detectaron diferencias significativas entre las densidades de 634, 761, 913 y 1.095 a lo largo de todo el período estudiado, excepto en el último año, donde el tratamiento de 761 plantas/ha se diferenció significativamente de la densidad de 634 (Tabla 3). El tratamiento de 582 plantas/ha creció significativamente menos que este grupo de tratamientos, siendo de 20,06 m la altura a los 10 años. En el tratamiento más denso

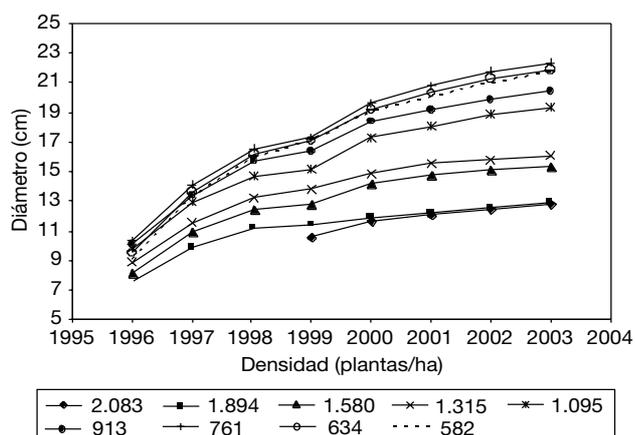


Figura 2. Evolución del crecimiento en diámetro de los 3 a los 10 años de edad para las densidades iniciales ensayadas.

(2.083 plantas/ha), el crecimiento en altura resultó solo un 18% menos con respecto al tratamiento que más creció (761 plantas/ha) (Figura 4).

Área basal

El análisis estadístico de g mostró que la interacción entre densidad y fecha era significativa ($p < 0,0001$). Se procedió entonces de forma similar a las otras variables, realizando un análisis dentro de cada año, los resultados se encuentran en la Tabla 4. La tendencia general de los datos indicó que la densidad inicial de plantación afectó el crecimiento en área basal, siendo ésta mayor en los tratamientos intermedios (Figura 5). Los valores absolutos de área basal estimado a la edad de 10 años muestran que el

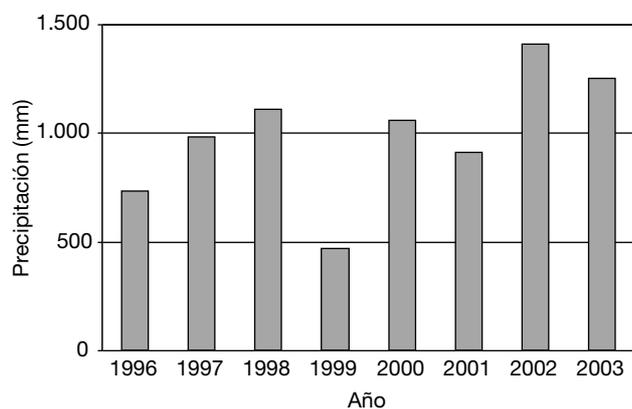


Figura 3. Evolución de las precipitaciones en Balcarce durante el período 1996-2003. Fuente: EEA INTA Balcarce. Serie 1993-2003. La disminución de la precipitación en el año 1999 se relacionó directamente al crecimiento.

máximo se registró para el tratamiento de 1.095 plantas/ha, con $32,66 \text{ m}^2/\text{ha}$. Los tratamientos que le siguen en magnitud al área basal son los de 913 plantas/ha, con un valor de $30,86 \text{ m}^2/\text{ha}$, y de 761 plantas/ha con $30,66 \text{ m}^2/\text{ha}$. El tratamiento de 582 plantas/ha creció un 23% menos en relación al tratamiento más denso.

Teniendo en cuenta que se trató de una semilla de origen comercial disponible hace 10 años atrás y habida cuenta de la existencia de materiales mejorados de esta especie (López *et al*, 2004), la potencialidad de la misma en la región es aún mayor.

En la Figura 6 se muestra la evolución del incremento anual de área basal. Independientemente del tratamiento, al disminuir las precipitaciones, se produce un marcado descenso del crecimiento. Así, durante el año 1999, las precipitaciones fueron de 432 mm, es decir un 50% de la media de la zona, lo que produjo un efecto directo sobre incremento en área basal.

Sin embargo, se observa que este efecto no persiste en el tiempo, y al retornar un régimen hídrico favorable los crecimientos vuelven a sus valores iniciales. La disminución posterior puede deberse ya a una declinación del crecimiento propia de la biología de la especie.

Densidad de madera

Densidad de la madera junto a crecimiento son los parámetros de selección más importantes en programas de mejora genética de *E. globulus* para pulpa de papel (Miranda *et al.*, 2001). Es considerada una ca-

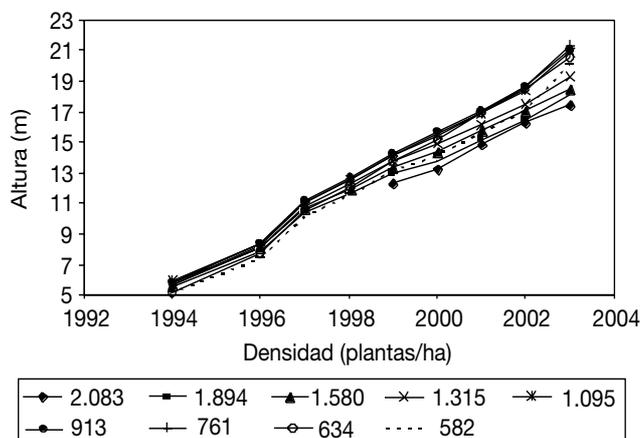


Figura 4. Evolución del crecimiento en altura del 3.º al 10.º año de edad para las densidades estudiadas.

Tabla 3. Comparaciones múltiples para efecto densidad sobre la altura dentro de cada año

Densidad		Edad				
Trat. vs. trat.		6	7	8	9	10
582	634		-1,0106*	-1,3406**	-1,4641**	-0,5681 NS
	761	-0,9943**	-1,2591**	-1,3383**	-1,4448**	-1,2082**
	913	-1,0762**	-1,5034**	-1,4280**	-1,5720**	-0,9160**
	1.095	-1,0061**	-1,2991**	-1,2771**	-1,2361**	
	1.315	-0,7062 NS	-0,8767*	-0,6727NS	-0,5487NS	0,6772NS
	1.580	-0,1874 NS	-0,2864 NS	-0,2435 NS	-0,1239NS	1,5556**
	1.894	0,1738 NS	0,2745 NS	0,2360 NS	0,4396 NS	2,0429**
	2.083	0,8200 NS	0,8822 NS	0,7342 NS	0,7680 NS	2,6084**
	634	761	-0,3762 NS	-0,2485 NS	0,002275 NS	0,01926 NS
913		-0,4581 NS	-0,4928 NS	-0,08739 NS	-0,1079 NS	-0,3479 NS
1.095		-0,3880 NS	-0,2885 NS	0,06356 NS	0,2280 NS	-0,1870 NS
1.315		-0,08809 NS	0,1338 NS	0,6679*	0,9154*	1,2454**
1.580		0,4307 NS	0,7242*	1,0971**	1,3402**	2,1237**
1.894		0,7919*	1,2850*	1,5766**	1,9037**	2,6110**
2.083		1,4381**	1,8928**	2,0748**	2,2321**	
761		913	-0,08187 NS	-0,2443 NS	-0,08966 NS	-0,1272 NS
	1.095	-0,01180 NS	-0,03996 NS	0,06129 NS	0,2088 NS	0,4532 NS
	1.315	0,2881 NS	0,3824 NS	0,6656 NS	0,8961**	1,8855**
	1.580	0,8069*	0,9727**	1,0949**	1,3210**	2,7638**
	1.894	1,1681**		1,5743**	1,8844**	3,2512**
	2.083	1,8143**	2,1413**	2,0726**	2,2128**	3,8167**
	913	1.095	0,07007 NS	0,2043 NS	0,1510 NS	0,3360 NS
1.315			0,6267 NS	0,7553*	1,0233**	1,5933**
1.580		0,8887 NS	1,2170**	1,1845**	1,4482**	2,4716**
1.894		1,2500 NS	1,7779**	1,6640**	2,0116**	2,9589**
2.083		1,8962 NS	2,3856**	2,1622**	2,3400**	3,5245**
1.095		1.315	0,2999 NS	0,4223 NS	0,6043*	0,6873*
	1.580	0,8187*	1,0127*	1,0336*	1,1122**	2,3107**
	1.894	1,1799**	1,5735**	1,5130**	1,6757**	2,7980**
	2.083		2,1813**	2,0113**	2,0041**	3,3635**
1.315	1.580	0,5188 NS	0,5903 NS	0,4292 NS	0,4249 NS	0,8784*
	1.894	0,8800*	1,1512**	0,9087*	0,9883**	1,3657**
	2.083	1,5262**	1,7590**	1,4070**	1,3167**	1,9312**
1.580	1.894	0,3612 NS	0,5609 NS	0,4795 NS	0,5635 NS	0,4873 NS
	2.083	1,0074 NS	1,1686*	0,9777 NS	0,8919 NS	1,0528*
1.894	2.083		0,6078 NS	0,4982 NS	0,3284 NS	0,5655 NS

NS: no se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 5%.* Se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 5%.** Se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 1%.

racterística de media a alta heredabilidad (revisado en López *et al.*, 2002) y su control genético permite obtener ganancias a favor de madera de mayor densidad. Sin embargo, son escasos los antecedentes del efecto de la densidad inicial de plantación sobre la densidad básica de la madera de *E. globulus*.

De las mediciones de Pilodyn realizadas a los seis años de plantación, Ferrere *et al.* (2003) reportan un

modelo tipo lineal simple ajustado para establecer la relación con la densidad de madera. Con estos datos se reconstruyeron las densidades de la madera para todos los tratamientos bajo estudio.

La densidad de madera fue levemente afectada por la densidad de plantación (Figura 7). El análisis estadístico encontró diferencias significativas ($p < 0,0376$) entre los tratamientos. Se realizó la prue-

Tabla 4. Comparaciones múltiples para efecto densidad sobre el área basal dentro de cada año

Densidad		Edad								
Trat. vs. trat.		3	4	5	6	7	8	9	10	
582	634	-0,3240 NS	-0,7446 NS	-1,0186 NS	-1,2362 NS	-2,0085 NS	-2,3614 NS	-2,7115 NS	-2,5666 NS	
	761	-2,1313 NS	-3,2606 NS	-4,3150*	-4,5414*	-6,2517**	-7,1368**	-7,8911**	-8,0240**	
	913	-3,0719 NS	-4,2940*	-5,5679*	-5,7044**	-7,4405**	-7,7403**	-7,9524**	-8,2261**	
	1.095	-3,9933 NS	-5,6197*	-6,3203**	-6,1418**	-8,4800**	-9,0443**	-9,8689**	-9,8066**	
	1.315	-3,9487 NS	-5,1182*	-5,9377**	-6,1805**	-6,4602**	-6,9078**	-6,0702**	-5,3546**	
	1.580	-3,91070, NS	-6,1969*	-6,9272**	-6,8289**	-8,4247**	-8,7096**	-8,3705**	-7,9068**	
	1.894	-3,9634 NS	-5,5886*	-6,4898**	-6,3141**	-6,0716**	-5,5776**	-4,8563*	-3,9940 NS	
	2.083				-5,9204*	-6,8054*	-6,6884*	-6,6369*	-6,6974*	
634	761	-1,8072 NS	-2,5160 NS	-3,2965*	-3,3051*	-4,2432*	-4,7755**	-5,1797**	-5,4573**	
	913	-2,7478 NS	-3,5493 NS	-4,5493*	-4,4682*	-5,4320**	-5,3789**	-5,2409**	-5,6595**	
	1.095	-3,6693 NS	-4,8751*	-5,3018*	-4,9055**	-6,4715**	-6,6830**	-7,1574**	-7,2400**	
	1.315	-3,6247*	-4,3736*	-4,9191**	-4,9442**	-4,4517*	-4,5464*	-3,3587 NS	-2,7880 NS	
	1.580	-3,5867*	-5,4523**	-5,9086**	-5,5926**	-6,4162**	-6,3482**	-5,6591**	-5,3402**	
	1.894	-3,6394*	-4,8440**	-5,4712**	-5,0779**	-4,0631*	-3,2163 NS	-2,1448 NS	-1,4274 NS	
	2.083				-4,6841 NS	-4,7969 NS	-4,3270*	-3,9254 NS	-4,1308 NS	
	761	913	-0,9406 NS	-1,0333 NS	-1,2528 NS	-1,1630 0 NS	-1,1888 NS	-0,6034 NS	-0,06125 NS	-0,2021 NS
1.095		-1,8620*	-2,3591 NS	-2,0053 NS	-1,6004 NS	-2,2283 NS	-1,9075 NS	-1,9778 NS	-1,7827 NS	
1,315		-1,8174*	-1,8576 NS	-1,6227 NS	-1,6391 NS	-0,2085 NS	0,2290 NS	1,8209 NS	2,6694 NS	
1.580		-1,7794 NS	-2,9363 NS	-2,6121 NS	-2,2875 NS	-2,1730 NS	-1,5727 NS	-0,4794 NS	0,1171 NS	
1.894		-1,8321 NS	-2,3280 NS	-2,1748 NS	-1,7728 NS	0,1801 NS	1,5592 NS	3,0348 NS	4,0299*	
2.083					-1,3790 NS	-0,5537 NS	0,4484 NS	1,2542 NS	1,3265 NS	
913		1.095	-0,9215 NS	-1,3258 NS	-0,7525 NS	-0,4373 NS	-1,0395 NS	-1,3040 NS	-1,9165 NS	-1,5805 NS
		1.315	-0,8768 NS	-0,8242 NS	-0,3698 NS	-0,4761 NS	0,9803 NS	0,8325 NS	1,8822 NS	2,8715 NS
	1.580	-0,8388 NS	-1,9029 NS	-1,3593 NS	-1,1245 NS	-0,9842 NS	-0,9693 NS	-0,4182 NS	0,3193 NS	
	1.894	-0,8915 NS	-1,2946 NS	-0,9219 NS	-0,6097 NS	1,3689 NS	2,1626 NS	3,0961 NS	4,2320*	
	2.083				-0,2159 NS	0,6351 NS	1,0519 NS	1,3155 NS	1,5287 NS	
	1.095	1.315	0,04461 NS	0,5015 NS	0,3826 NS	-0,03871 NS	2,0198 NS	2,1365 NS	3,7987 NS	4,4520*
		1.580	0,08261 NS	-0,5772 NS	-0,6068 NS	-0,6871 NS	0,05533 NS	0,3347 NS	1,4984 NS	1,8998 NS
		1.894	0,02991NS	0,03113 NS	-0,1695 NS	-0,1724 NS	2,4084 NS	3,4667 NS	5,0126*	5,8126**
2.083					0,2214 NS	1,6746 NS	2,3559 NS	3,2320 NS	3,1092 NS	
1.315	1.580	0,03800NS	-1,0787 NS	-0,9895 NS	-0,6484 NS	-1,9645 NS	-1,8018 NS	-2,3003 NS	-2,5522 NS	
	1.894	-0,01469 NS	-0,4704 NS	-0,5521 NS	-0,1337 NS	0,3886 NS	0,326 NS	1,2139 NS	1,3605 NS	
	2.083				0,2601 NS	-0,3452 NS	0,2194 NS	-0,5667 NS	-1,3428 NS	
1.580	1.894	-0,05269 NS	0,6083 NS	0,4374 NS	0,5147 NS	2,3531 NS	3,1319 NS	3,5142 NS	3,9128 NS	
	2.083				0,9085 NS	1,6193 NS	2,0212 NS	1,7336 NS	1,2094 NS	
1.894	2.083				0,3938 NS	-0,7338 NS	-1,1108 NS	-1,7806NS	-2,7034 NS	

NS: no se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 5%. * Se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 5%. ** Se encontraron diferencias significativas con un nivel de significancia del 1%.

ba de comparaciones múltiples para determinar entre qué densidades había diferencias. Se encontraron diferencias significativas entre las mayores y menores densidades de plantación. Así, por ejemplo, el tratamiento de 634 plantas/ha se diferenció estadísticamente con todas las densidades mayores a 1.000 plantas/ha. Sin embargo, estas diferencias fueron solo del 4,1% entre los tratamientos más diferentes (1.894 y 634 plantas/ha).

Espesor de corteza

El espesor de corteza como proporción del diámetro no se diferenció estadísticamente ($p < 0,2220$) entre los tratamientos de densidad de plantación ensayados (Figura 8). Si bien varió con los tratamientos estudiados, la proporción de corteza en relación al diámetro se mantuvo aproximadamente constante, resultando en promedio del 7,8%.

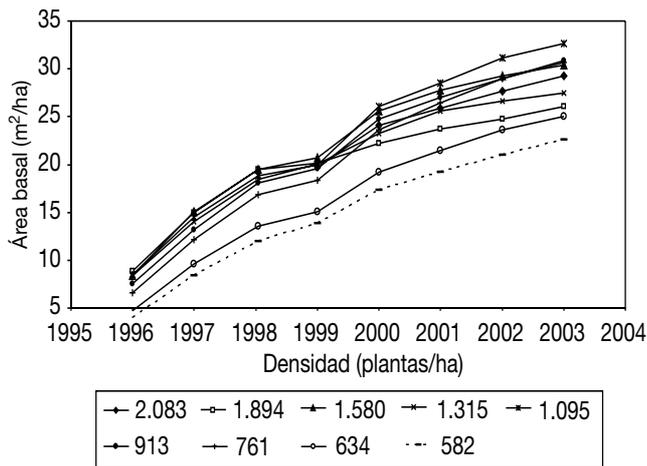


Figura 5. Evolución del área basal del 3.º al 10.º año de edad para las densidades iniciales ensayadas.

Discusión

La relación inversa entre diámetro y densidad de plantación encontrada en el ensayo de *E. globulus* instalado en Balcarce es consistente con estudios previos realizados en *Eucalyptus*. Por ejemplo, Dalla-Tea (1995) trabajando con *E. grandis* en Entre Ríos en un ensayo con el mismo diseño encontró variaciones de hasta el doble del crecimiento en diámetro entre los tratamientos extremos. En otro estudio, pero con *E. globulus* en Chile, a los 12 años se midieron valores de 31,3 cm de diámetro en parcelas con una densidad de 625 plantas (con 2 raleos), en tanto que con la misma densidad inicial sin raleos, se obtuvo un creci-

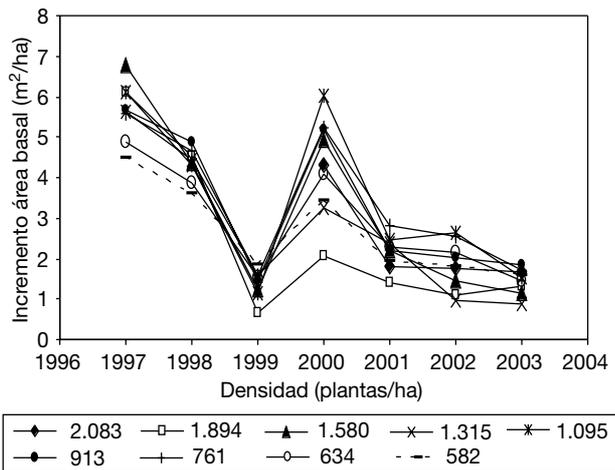


Figura 6. Incremento corriente anual (ICA) del área basal desde los 3 a los 10 años de edad para las densidades iniciales de plantación. El incremento en área basal del año 1997 corresponde al período 1996-1997.

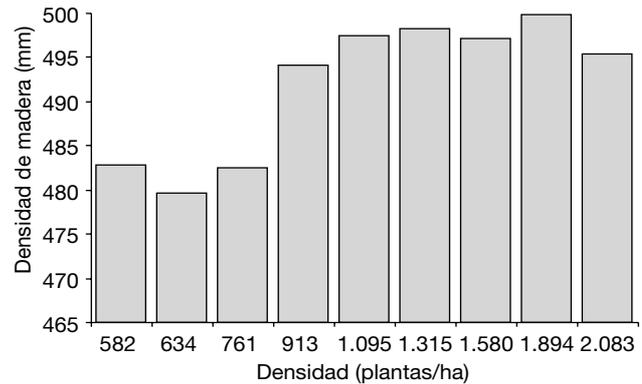


Figura 7. Densidad de madera de *Eucalyptus globulus* a los 6 años de edad para las densidades iniciales de plantación.

miento de 21,6 cm (Pinilla Suárez y Ulloa, 2001). Con la densidad inicial mas alta (2.500 plantas/ha), el crecimiento en diámetro fue de 11,2 cm. En este caso en particular, el estudio indica la respuesta de la especie tanto a la densidad inicial como a la aplicación de prácticas de raleo.

Madrigal *et al.* (1999) indican que la productividad de *E. globulus* en Galicia está fuertemente condicionada por la calidad de sitio. Los crecimientos encontrados en el presente trabajo se aproximan a los de mayor productividad (Calidad I) para densidades y edades similares a los citados por Madrigal *et al.* (1999). Así, a los 10 años, para una densidad de 1.111 plantas/ha, dichos autores encontraron un diámetro de 19,30 cm y una altura media de 21,30 m. Al aumentar la densidad a 1.600 plantas/ha, el diámetro fue de 16,60 cm y la altura de 19,80 m.

En general la variable altura tiende a aumentar al disminuir la densidad de plantación inicial, en forma similar al diámetro. Estos resultados concuerdan con

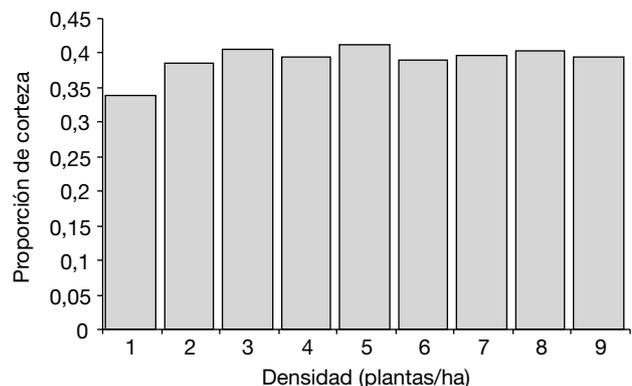


Figura 8. Proporción de corteza (espesor/diámetro) de *Eucalyptus globulus* a los 6 años de edad para las densidades iniciales de plantación.

la tendencia citada por otros autores (Dalla-Tea, 1995; Pinilla Suárez y Ulloa, 2001). El menor crecimiento mostrado por el tratamiento de 582 plantas/ha no pudo ser explicado en el presente trabajo.

Si bien se considera que existe una leve sobreestimación en los datos al no afectarlos por mortalidad, debido a que se trabajó con parcelas de árboles individuales, estos valores son superiores a los reportados por Pinilla Suárez y Ulloa (2001), quienes para tratamientos aun más densos (2.500 plantas/ha.) citan valores de 24,71 m²/ha con la misma especie en Chile. Es probable que esta discrepancia esté determinando la diferente productividad de los ambientes ensayados en Chile y Argentina.

De la comparación de los valores de área basal calculada en los tratamientos de 2.083 y 1.095 plantas/ha se desprende que disminuyendo la densidad de plantación en casi un 50%, el crecimiento en área basal se ve aumentado en un 12%, lo cual justifica la disminución de la densidad, que además de incrementar el crecimiento supone una notable reducción de los costos de implantación. Por otra parte, una reducción de la densidad inicial por debajo de 1.095 plantas/ha, en una especie particularmente apta para la industria celulósica como lo es *Eucalyptus globulus*, determinará pérdidas importantes en área basal y por ende, en volumen por hectárea, que no se compensarán con un mayor crecimiento individual de los árboles, al menos en el corto plazo. Es de esperar que la aplicación de prácticas silvícolas intensivas (control de malezas, fertilización, entre otros) aumente la productividad de estas plantaciones comerciales, tal como sugiere Dalla-Tea (1995).

Si bien se detectaron diferencias significativas en la densidad de madera de los distintos tratamientos, éstas fueron de escasa relevancia. Las evaluaciones realizadas al sexto año sobre la proporción del espesor de corteza en relación al diámetro permiten inferir que la densidad inicial de plantación no afecta el comportamiento de esta variable.

Conclusiones

El espaciamiento inicial empleado en un ensayo de *E. globulus* en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, determinó una productividad diferencial en los tratamientos estudiados. La tendencia general fue a aumentar el crecimiento en diámetro con la disminución de la densidad. Una tendencia similar

a la observada para el diámetro, aunque menos manifiesta, ocurrió para la altura.

Una fuerte disminución en el incremento corriente anual del área basal coincidió con un año de precipitaciones escasas, entre el quinto y sexto año de plantado, lo cual puede llegar a sensibilizar los datos si no se consideran las tendencias a lo largo de un lapso de tiempo.

Si bien la densidad inicial de plantación responde a las condiciones del sitio y éstos son variables en el sudeste bonaerense de Argentina, el mejor crecimiento para plantaciones de *E. globulus* según las condiciones de ensayo se demostró con el empleo de densidades de 1.095 plantas/ha. En este tratamiento, al décimo año, se logró una adecuada combinación entre el crecimiento individual de los árboles y del rodal (diámetro 19,44 cm y área basal de 32,66 m²/ha). Técnicas de manejo intensivo permitirán incrementar la productividad de los sitios. Si bien no se encontraron antecedentes, los resultados encontrados en el presente trabajo indican que la densidad de plantación afecta levemente la densidad de madera, siendo mayor en los tratamientos más densos. La proporción de corteza en relación al diámetro no se vió afectada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Ings. R. Alliani y J. Rodríguez Traverso por el establecimiento del ensayo, al Ing. P. Gelid por participar en la colección de datos y la discusión del trabajo y al Ing. R. Moschini por facilitar los datos meteorológicos. También se reconoce las sugerencias de un referee anónimo para mejorar el manuscrito. Este estudio ha sido desarrollado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y ha contado con el financiamiento del Proyecto Forestal de Desarrollo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la República Argentina.

Referencias bibliográficas

- BERNARDO A., REIS M., REIS G., HARRISON R., FIRME D., 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. For Ecol Manag 104(1-3), 1-13.
- BROOKER M., KLEINIG D., 1990. Field guide to Eucalypts South-eastern Australia. Vol 2. Ed. Inkata Press, 205 pp.

- COETZEE J., 1991. The influence of stand density on the yield of *Eucalyptus grandis*: a comparison between a good site and a poor site at age 4 years. IUFRO Symposium. Intensive Forestry. The role of Eucalypts. Durban, South Africa, 2-6 de septiembre. Vol. 2. pp. 901-916.
- CULOT J., 2000. Caracterización edafoclimática de la región sudeste de la Provincia de Buenos Aires para *Eucalyptus globulus*. Primer Seminario Internacional de *Eucalyptus globulus* en la Argentina, Mar del Plata, Argentina, 6 y 7 de diciembre. pp. 2-9.
- DALLA-TEA F., 1995. Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos, Argentina. Invest Agrar: Sist Recur For 4(1), 57-71.
- DANIEL P., HELMS U., BAKER F., 1982. Principios de Silvicultura. Ed. Mc Graw-Hill, 492 pp.
- FERRERE P., GALETTI M., ESPARRACH C., GELID P., PATHAUER P., LÓPEZ G., 2003. Incidencia de la densidad inicial de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus*. CD Proceedings X Jornadas Forestales, Eldorado, Argentina, 25-26 de septiembre.
- GARCÍA O., 1994. Minimum data for forest plantation management. IUFRO Conference Minimum Data Requirement for Sustainable Forest Management, Stellenbosch, South Africa.
- GELID P., RODRÍGUEZ TRAVERSO J., PATHAUER P., 2001. Empleo de Pilodyn 6J-Forest, en programas de mejoramiento forestal, para *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*, *E. globulus* ssp. *maidenii* y *E. dunnii*. IUFRO Conference. CD The Eucalypts of the future, Valdivia, Chile, 10-15 de septiembre.
- GERRAND A., NEILSEN W., 2000. Comparing square and rectangular spacings in *Eucalyptus nitens* using a Scotch plaid design. For Ecol Manag 129(1-3), 1-6.
- GREAVES B., BORRALHO N., RAYMOND C., FARRINGTON A., 1996. Use of a pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. Can J For Res 26, 1643-1650.
- LITTELL R., MILLIKEN G., STROUP W., WOLFINGER R., 1996. SAS System for Mixed Models, Cary, NC: SAS Institute Inc. 633 pp.
- LÓPEZ G., POTTS B., DUTKOWSKI G., RODRÍGUEZ TRAVERSO J., 2001. Quantitative genetics of *Eucalyptus globulus*: Affinities of land race and native stand localities. Silvae Genetica 50(5-6), 244-252.
- LÓPEZ G., POTTS B., DUTKOWSKI G., APIOLAZA L., GELID P., 2002. Genetic variation and inter-trait correlations in a *Eucalyptus globulus* base population in Argentina. International Journal of Forest Genetics 9(3), 223-237.
- LÓPEZ G., PATHAUER P., GALETTI M., ESPARRACH C., 2004. Avances en el desarrollo de germoplasma de *Eucalyptus globulus*. SAGPyA Forestal 30, 3-6.
- MADRIGAL A., ÁLVAREZ GONZÁLEZ J.G., RODRÍGUEZ SOALLEIRO R., ROJO A., 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fund Conde del Valle de Salazar. 253 pp.
- MIRANDA I., ALMEIDA M., PEREIRA H., 2001. Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. at harvest age and its relation to a non-destructive early assessment. For Ecol Manag 149(1-3), 235-240.
- MOSCHINI R., CONTI H., ALONSO M., RODRÍGUEZ TRAVERSO J., NAKAMA V., ALFIERI A., 2000. Delimitación de áreas de aptitud climática para el cultivo de eucaliptos en la región pampeana. SAGPyA Forestal 15, 2-11.
- MUSHOVE P., 1991. Comparison of three Eucalypt species in Nelder wheel spacing trials on four Zimbabwean sites. IUFRO Symposium. Intensive Forestry. The role of Eucalypts. Durban, South Africa, 2-6 de septiembre. Vol. 2. pp. 940-951.
- NEILSEN W., GERRAND A., 1999. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection. For Ecol Manag 123(2-3), 217-229.
- NELDER J., 1962. New kinds of systematic designs for spacing experiments. Biometrics 18, 283-307.
- PATHAUER P., LÓPEZ G., GELID P., 2003. Evaluación de subespecies de *Eucalyptus globulus*. CD Proceedings Simposio Iberoamericano de *Eucalyptus globulus*, Montevideo, Uruguay, 30-31 octubre.
- PINILLA SUÁREZ J., ULLOA I., 2001. Nuevos resultados en un ensayo de espaciamiento y raleo con *Eucalyptus globulus* en Constitución (VII Región). IUFRO Conference. CD The Eucalypts of the future, Valdivia, Chile, 10-15 de septiembre.
- POTTS B., VAILLANCOURT R., JORDAN G., DUTKOWSKI G., COSTA E SILVA J., MCKINNON G., STEANE D., VOLKER P., LÓPEZ G., APIOLAZA L., LI Y., MÁRQUEZ C., BORRALHO N., 2004. Exploration of the *Eucalyptus globulus* gene pool. IUFRO Conference Eucalyptus in a changing world, Averoio, Portugal, 11-15 de octubre. pp. 46-61.
- RODRÍGUEZ TRAVERSO J., 2000. Conclusiones del cierre del Convenio de Mejoramiento Genético INTA-SOPORCEL (1996-2000) Resultado de las introducciones realizadas. Producción de semilla mejorada. (Primera parte). Primer Seminario Internacional de *Eucalyptus globulus* en la Argentina, Mar del Plata, Argentina, 6 y 7 de diciembre. pp. 11-24.
- SAS USER'S GUIDE, 1999. SAS Inst Cary, NC. SAS Institute.
- SCHÖNAU A., COETZEE J., 1989. Initial Spacing, stand density and thinning in Eucalypt plantations. For Ecol Manag 29(4), 245-266.