

EFFECTO DEL MANEJO SILVÍCOLA SOBRE LA DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA EN SISTEMAS FORESTALES DE ROTACIÓN CORTA

EFFECT OF SILVICULTURAL MANAGEMENT ON WOOD DENSITY FROM SHORT ROTATION FOREST SYSTEMS

Humberto de Jesus Eufrade-Junior^{1,*}, Adriano Wagner Ballarin²,
Gabriela Carolina Villamagua-Vergara¹, Saulo Philipe Sebastião Guerra³

RESUMEN

Los sistemas forestales de rotación corta (SFRC) son establecidos en condiciones que difieren del manejo convencional, con una alta densidad de especies arbóreas en el plantío y mayores dosis de fertilización; así como periodos de cosecha más cortos. Aún hoy, son pocos los estudios sobre la calidad de biomasa producida en estos sistemas. Este trabajo tuvo por objetivo analizar el efecto del espaciamiento del plantío y fertilización sobre la densidad básica del fuste de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (clone C219) en un sistema de rotación corta a los dos años de edad. Los resultados muestran que el espaciamiento del plantío y la fertilización produjeron un efecto significativo sobre la densidad de madera. La densidad básica fue mayor en los plantíos con espaciamientos menos densos (2380 árboles ha⁻¹) próximo de 375 kg m⁻³, y en el de mayores dosis de fertilizantes (140 g planta⁻¹) de 379 kg m⁻³. Los valores encontrados fueron próximos al de otras especies forestales manejadas en sistemas de rotación corta para bioenergía en el mundo.

Palabras claves: Biomasa, densidad de plantación, *Eucalyptus*, fertilización, silvicultura.

ABSTRACT

The short rotation forest systems are managed under conditions that differ from conventional management with greater density planting and fertilizer levels, also shorter harvesting cycles. Even today, there are few studies about the quality of the biomass produced on these systems. This work aimed to analyze the effect planting spacing and fertilizing levels in the stem basic density of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (clone C219) from short rotation system at two years of age. The results showed that the density was affected significantly by planting spacing and fertilization. It was higher for the lower planting spacing (2380 trees ha⁻¹) about 375 kg m⁻³ and greater fertilizer level (140 g plant⁻¹) to 379 kg m⁻³. The values found were close to other forest species managed in short rotation systems for bioenergy in the world.

Keywords: Biomass, Eucalyptus, fertilization, planting density, silviculture.

¹Estudiante de Doctorado en Ciencia Forestal, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Estatal Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu, Brasil.

²Profesor Titular, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Estatal Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu, Brasil.

³Profesor Asistente Doctor, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Estatal Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu, Brasil. Laboratorio Agro-Forestal de Biomasa y Bioenergía - LABB, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Estatal Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP, Calle Dr. Barbosa de Barros, Botucatu, Brasil.

*Autor para correspondencia: hdjejunior@fca.unesp.br

Recibido: 22.03.2016 Aceptado: 19.03.2017

INTRODUCCIÓN

Los sistemas forestales de rotación corta (SFRC) son establecidos en condiciones que difieren del manejo convencional, con una alta densidad de especies arbóreas en el plantío y mayores dosis de fertilización; así como periodos de cosecha más cortos. La biomasa producida en estos sistemas es utilizada comúnmente para fines energéticos, convertida en viruta es direccionada para la quema directa en calderas o es procesada en forma de briquetas y pellets, a fin de mejorar sus condiciones físicas y térmicas (Guerra *et al.* 2014).

Estos sistemas son manejados de forma adensada en hileras simples o dobles con intervalos de corte de dos a tres años. La densidad de la plantación depende de factores como la especie o el tipo de sistema de colecta utilizado. En el Brasil, el género *Eucalyptus*, comúnmente utilizado para fines energéticos (Gonçalves *et al.* 2014) posee el mayor rendimiento para la producción de biomasa en un corto espacio de tiempo, los plantíos adensados de esta especie alcanzan valores mayores a los 50 m³ de madera por hectárea (20 o 25 toneladas por hectárea año) en ciclos de un año en espaciamientos de 3 m x 0,5 m - 6667 árboles ha⁻¹ (Müller 2005) hasta 120 m³ ha⁻¹ (45 toneladas por hectárea año) en condiciones adecuadas de manejo (Guerra *et al.* 2014). En otros países que utilizan esta tecnología (Senelwa y Sims 1999), los índices de productividad brasileña únicamente son alcanzados con el doble del tiempo.

El uso de maderas de baja densidad para la producción directa de energía en la forma de calor implica una combustión rápida y una menor producción de energía por unidad de volumen, al contrario de lo observado con maderas de mayor densidad. Sin embargo, maderas de alta densidad presentan dificultad para iniciar la combustión del material (Vale *et al.* 2002).

La dotación de un combustible homogéneo es fundamental para el desarrollo de un sistema energético más eficiente y con un alto rendimiento. Actualmente, no existe un consenso sobre la variación de la densidad básica de madera manejada en sistemas de rotación corta (Eloy *et al.* 2014, Sereghetti *et al.* 2015, Garcia *et al.* 2016).

Por tanto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el efecto del espaciamiento del plantío y la fertilización sobre la densidad básica del fuste de eucalipto en un sistema de rotación corta a los dos años de edad.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio y diseño experimental

El experimento fue establecido en la finca Três Sinos, localizada en la carretera Gastão Dal Farra, km 5, en el municipio de Botucatu, Estado de San Pablo, Brasil, en las siguientes coordenadas: longitud 48°26'42" W e latitud 22°53'09" S; con una altitud de 872 m s.n.m.; precipitación media de 1428 mm año; y temperatura media anual de 20 °C. De acuerdo con el mapa de suelos del municipio de Botucatu, los suelos corresponden a Latosol Rojo Amarillento con textura media (Vettorato 2003).

El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial de 3 × 3 (espaciamientos x dosis de fertilización), con 9 tratamientos. Cada tratamiento correspondió a una parcela de 450 m². Para el análisis destructivo de densidad básica de la madera se eligió una muestra de 36 árboles, seleccionándose cuatro árboles por tratamiento.

En la plantación fueron utilizados clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (clon C219) plantados a tres diferentes espaciamientos entre plantas y un mismo espaciamiento entre hileras, esto es: 2,8 m x 0,5 m (7142 árboles ha⁻¹); 2,8 m x 1,0 m (3571 árboles ha⁻¹); 2,8 m x 1,5 m (2380 árboles ha⁻¹). La fertilización inicial y de mantenimiento fue realizada en tres dosis diferentes, las cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los regímenes de fertilización en el experimento.

Fertilizantes	Días después del plantío	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3
		g planta ⁻¹		
NPK (6-30-10)	0	35,0	70	140
NPK (19-00-19) + B (0,7%) e Zn (3%)	180	27,5	55	110
NPK (19-00-19) + B (0,7%) e Zn (3%)	360	27,5	55	110

Determinación de la densidad básica ponderada del fuste

Inicialmente se cubicaron los árboles una vez apeados por la fórmula de Smalian. Posteriormente, de cada uno se retiraron discos con 3 cm de espesura a 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del fuste comercial, según la metodología descrita por Vital (1984). Para fines energéticos, la madera fue aprovechada con corteza y la altura comercial fue considerada igual a la altura total del árbol.

Las muestras fueron sumergidas en agua inmediatamente después de la colecta. Las cuales fueron consideradas saturadas cuando presentaron masa constante durante el monitoreo en el laboratorio. Posteriormente, las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C ± 2 °C para obtener la masa seca. El volumen de saturación fue obtenido por el método de la balanza hidrostática. De esta forma, la densidad básica de la madera con corteza en cada posición del fuste fue calculada por la relación entre la masa seca y el volumen saturado de acuerdo con la norma brasileña ABNT NBR 11941 (ABNT 2003). Así, la densidad básica ponderada por el volumen de cada posición de los discos en los árboles muestreados fue obtenida por medio de la Ecuación 1.

$$D_{b,pond} = \left(\frac{D_{b(0-25\%)} \times V_{(0-25\%)} + \dots + D_{b(75-100\%)} \times V_{(75-100\%)}}{V_{(0-25\%)} + V_{(25-50\%)} + V_{(50-75\%)} + V_{(75-100\%)}} \right) \quad (1)$$

Dónde:

$D_{b,pond}$ = densidad básica de la corteza ponderada por el volumen (kg m⁻³),

D_b = densidad básica media entre los discos en la posición considerada (kg m⁻³);

V = volumen de la sección del fuste en la posición considerada (m³).

Análisis de datos

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos primero se realizó el cálculo de parámetros estadísticos descriptivos, dentro de los cuales se consideraron la media y desviación estándar. Estos estadígrafos se calcularon para la variable densidad básica y por tratamiento. Posteriormente, se utilizó el análisis de la varianza (ANOVA) y el test de Tukey para la comparación de medias ($p \leq 0,05$), habiendo comprobado el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad por medio de la prueba de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$). Los análisis fueron realizados en el programa estadístico R (R Development Core Team 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El espaciamiento entre plantas y la fertilización produjeron un efecto significativo sobre la densidad básica de la madera a los 24 meses de edad (Tabla 2). Sin embargo, no hubo interacción significativa entre factores.

Tabla 2. Análisis de varianza para densidad básica de la madera.

Factor de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaciamiento	2	1786	893	4,210	0,026*
Fertilización	2	1501	750	3,537	0,043*
Interacción	4	95	24	0,112	0,977
Residuos	27	5728	212		
Total	35	9110			

* Significativo a 5% por la prueba F.

Comparando la mayor y la menor dosis de fertilizantes (35 y 140 g planta⁻¹) se encontró un aumento de la densidad básica del fuste de 4,3%. (Tabla 3). Los datos sugieren que altas dosis de fertilizantes tienden a aumentar la densidad de la madera.

La Dosis 3 (cuatro veces mayor que la Dosis 1) posibilitó un mayor desarrollo de la madera. Según Sette Jr *et al.* (2014), la fertilización mineral influye en las características anatómicas (espesura de la pared celular y diámetro del lumen, diámetro de los vasos) del leño en plantaciones convencionales de eucalipto. Esa alteración puede acarrear una variación en la densidad básica de la madera.

Tabla 3. Media (kg m⁻³) y desviación estándar (± %) de densidad básica de la madera y por tratamiento en SFRC de *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* a los dos años de edad.

Espaciamientos	Dosis			Media (kg m ⁻³)
	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3	
2,8 m × 0,5 m	354,5 ± 7,9	360,9 ± 10,1	370,7 ± 22,4	362,0 ± 8,1 b
2,8 m × 1,0 m	367,6 ± 15,6	380,3 ± 6,2	385,9 ± 2,60	378,0 ± 9,4 a
2,8 m × 1,5 m	368,8 ± 14,0	373,3 ± 25,1	381,6 ± 11,4	374,6 ± 6,5 a
Media (kg m ⁻³)	363,7 ± 7,9 b	371,5 ± 9,8 ab	379,4 ± 7,9 a	

* Medias con una letra en común no difieren por la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Cabe recalcar, que el efecto de la fertilización debe ser analizado con cautela, teniendo en cuenta que el turno de corta en este estudio (2 años) fue menor al periodo normal de corta, en este tipo de sistemas forestales (3 a 3,5 años). De esta forma, nuevos experimentos con esta temática deben llevar en consideración también la rebrota de los SFRC.

Para el espaciamiento del plantío, fue observada una reducción de la densidad de madera en 3,4% en los espaciamientos más densos (2,8 m x 0,5 m). El efecto del espaciamiento del plantío se debe en parte, al espacio vital del árbol, que está directamente relacionada con la competencia por agua, luz e nutrientes (Schneider *et al.* 2015). Según Goulart *et al.* (2003), esa variación fue de hasta 15% para plantaciones de *Eucalyptus grandis* con 10 años de edad y diferentes densidades de plantío (833 a 10000 árboles ha⁻¹).

Para clones, espaciamentos de plantación y edades similares, pero con el doble de fertilizantes ($280 \text{ g planta}^{-1}$), García *et al.* (2016) reportaron valores de densidad básica de 410 kg m^{-3} a 447 kg m^{-3} . Los mismos autores verificaron la influencia del espaciamento de plantación, siendo que la densidad básica disminuye con una alta densidad del plantío, lo cual fue corroborado con este estudio.

Sin embargo, para el clon I144 de la misma especie evaluada en este estudio, Sereghetti *et al.* (2015) no obtuvieron efecto significativo en el espaciamento del plantío. Estos autores registraron una densidad básica de madera de 356 kg m^{-3} con 12 meses de edad para espaciamentos de $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, y dosis de fertilizante de 60 g planta^{-1} . El mismo resultado fue reportado por Eloy *et al.* (2014) en sistemas de rotación corta de *Eucalyptus grandis* con densidades básicas de 382 kg m^{-3} y 391 kg m^{-3} para densidades de plantío de 2222 y 5000 árboles ha^{-1} , respectivamente. De esta forma, estos experimentos sugieren que otros factores como: tipo de suelo, clima y edad de la especie plantada; también interfieren en la densidad básica de la madera y deben ser estudiados más a profundidad.

En la Tabla 4 se presentan los valores de densidad básica de madera de otras especies forestales manejadas en sistemas de rotación corta para bioenergía en el mundo. Los resultados fueron próximos a los encontrados en la literatura, destacándose, con la mayor densidad básica de madera, la especie *Salix kinuyanagi* de tres años de edad.

Para plantíos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* manejados como árboles forestales de rotación corta, en espaciamento de $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, Gonçalves *et al.* (2009) registraron una densidad básica próxima a 450 kg m^{-3} a los 70 meses de edad. Para *Eucalyptus nitens* a los 180 meses, Bravo *et al.* (2012) reportaron un D_b media de 484 kg m^{-3} . Los valores no son muy distantes de los presentados en SFRC a los 24 meses de edad, evidenciando el potencial de las plantaciones densas de ciclo corto.

Tabla 4. Densidad básica de madera de algunas especies forestales en sistemas de rotación corta.

Especie	D_b (kg m^{-3})	Edad (años)	Número Árboles ha^{-1}	Local y Fuente
<i>Acacia dealbata</i>	366	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Alnus glutinosa</i>	316	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Eucalyptus nitens</i>	411	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Eucalyptus saligna</i>	446	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Eucalyptus ovata</i>	407	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Pinus radiata</i>	282	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Salix kinuyanagi</i>	450	3	3470	Nueva Zelanda, Senelwa y Sims (1999)
<i>Salix alba</i>	381	2	4444	Yugoslavia, Klasnja <i>et al.</i> (2002)
<i>Populus deltoides</i>	402	2	4444	Yugoslavia, Klasnja <i>et al.</i> (2002)
<i>Eucalyptus</i> sp.	362	2	7142	Brasil, presente estudio
<i>Eucalyptus</i> sp.	378	2	3571	Brasil, presente estudio
<i>Eucalyptus</i> sp.	375	2	2380	Brasil, presente estudio

A pesar de haber obtenido valores menores de densidad básica de la madera para el espaciamento más denso (362 kg m^{-3}), debe ser puesto en consideración, que el mayor número de árboles por hectárea promueve una mayor productividad (Guerra *et al.* 2014, Magalhães *et al.* 2005). Ambos parámetros, propiedades de madera y atributos silviculturales, deben ser considerados en el planeamiento forestal (Turinawe *et al.* 2014) y en la selección del mejor SFRC a escala comercial.

Por último, aun no existe un consenso en la literatura sobre la variación de las propiedades de la madera en relación al manejo adoptado, como es: la densidad del plantío, dosis de fertilización, edad de colecta, desbaste, entre otros. Dentro de las técnicas de manejo mencionadas, existe una tendencia, de una mayor variación de las propiedades en función de la edad de corte, posiblemente debido a la madurez de la madera, conquistadas a lo largo del tiempo (madera adulta y duramen). Las investigaciones apuntan con más claridad a establecer la influencia del manejo forestal en las características generales de las plantaciones, como diámetro y altura de los individuos, productividad y proporción entre los componentes del árbol (Bravo *et al.* 2012, Bernardo *et al.* 1998).

CONCLUSIONES

De manera aislada, el espaciamiento del plantío y la fertilización produjeron un efecto significativo sobre la densidad básica de la madera con corteza en los sistemas forestales de rotación corta de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* a los 24 meses de edad. La densidad básica de la madera aumentó con las mayores dosis de fertilizantes. Lo mismo ocurrió con los mayores espaciamientos del plantío.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio Agro-Forestal de Biomasa y Bioenergía (LABB) perteneciente al Instituto de Investigación en Bioenergía (IPBEN) y a la Facultad de Ciencias Agronómicas (FCA/UNESP) por la estructura, y a la Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior (CAPES) por el financiamiento del estudio.

REFERENCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. 2003. Madeira – determinação da densidade básica, **NBR 11941**. Rio de Janeiro. Brasil.

Bravo, S.D.; Espinosa, M.; Valenzuela, L.; Cancino J.; Lasserre, J.P. 2012. Effect of thinning on growth and some properties of wood of *Eucalyptus nitens* in a plantation of 15 years old. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14(3): 373-388.

Bernardo, A.L.; Reis, M.G.F.; Reis, G.G.; Harrison, R.B. 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: 1-13.

Eloy, E.; Caron, B.O.; Silva, D.A.; Schmidt, D. Trevisan, R.; Behling, A.; Elli, E.F. 2014. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. *Revista Árvore* 38(3):551-559.

García, E.A.; Guerra, S.P.S.; Lanças, K.P.; Eufraide Junior, H.J.; Yamaji, F.M.; Sansigolo, C.A. 2016. Componentes químicos da madeira com casca proveniente do sistema florestal de curta rotação. *Revista Árvore* 40(1):163-171.

Gonçalves, F.G.; Oliveira, J.T.S.; Della Lucia, R.M.; Nappo, M.E.; Sartório, R.C. 2009. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. *Revista Arvore* 33(2):277-288.

Gonçalves, T.A.P.; Ballarin, A.W.; Nisgoski, S.; Muñiz, G.I.B. 2014. A contribution to the identification of charcoal Origin in Brazil I – anatomical characterization of Corymbia and Eucalyptus. *Maderas. Ciencia y tecnología* 16(3): 323-336.

Goulart, M.; Haselein, C.R.; Hoppe, J.M.; Farias, J.A.; Pauleski, D.T. 2003. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. *Ciência Florestal* 13(2):167-175.

Guerra, S.P.S.; Garcia, E.A.; Lanças, K.P.; Rezende, M.A.; Spinelli, R. 2014. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. *Fuel* 137:360-363.

Klasnja, B.; Kopitovic, S.; Orlovic, S. 2002. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass and Bioenergy* 23:427-432.

Magalhães, W.M.; Macedo, R.L.G.; Venturim, N.; Higashikawa, E.M.; Yoshitani Junior, M. 2005. Desempenho silvicultural de espécies de *Eucalyptus* spp. em quatro espaçamentos de plantio na região noroeste de Minas Gerais. *Floresta e Ambiente* 12(1): 1-7.

Müller, M.D. 2005. Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba. Ph.D. Tese, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, Brasil.

R Development Core Team. 2013. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. Viena: R Foundation for Statistical Computing. [Disponível em:] <<http://www.R-project.org/>> [acessado em: 30 de jan. 2016].

Schneider, P.R.; Finger, C.A.G.; Schneider, P.S.P.; Fleig, F.D.; Cunha, T.A. 2015. Influência do espaçamento no autodesbaste de povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna* Smith. *Ciência Florestal* 25(1):119-126.

Senelwa, K.; Sims, R.E.H. 1999. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy* 17: 127-140.

Sette Jr, C.R.; Deus JR, J.C.; Tomazello Filho, M.; Pádua, F.A.; Calil, F.N.; Laclau, J.P. 2014. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. *Cerne* 20(2): 251-258.

Sereghetti, G.C.; Lanças, K.P.; Sartori, M.S.; Rezende, M.A.; Soler, R.R. 2015. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. *Energia na Agricultura* 30: 257-262.

Turinawe, H.; Mugabi, P.; Tweheyo, M. 2014. Density, calorific value and cleavage strength of Selected hybrid eucalypts grown in Uganda. *Maderas. Ciencia y tecnología* 16(1): 13-24.

Vale, A.T.; Brasil, M.A.M.; Leão, A L. 2002. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. *Ciência Florestal* 12(1): 71-80.

Vettorato, J.A. 2003. Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistemas de informação geográfica. Dissertação, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, Brasil.

Vital, B.R. 1984. Método de determinação da densidade da madeira. Boletim Técnico. *SIF* 1:1-21.