Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia*
produzido em diferentes temperaturas finais de carbonizaçãoQuality of charcoal from *Corymbia* and *Eucalyptus*
produced at different final carbonization temperaturesAllan Motta Couto¹, Paulo Fernando Trugilho², Alfredo Napoli³, José Tarcísio Lima⁴,
José Reinaldo Moreira da Silva⁵ e Thiago de Paula Protásio⁶

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da posição radial e temperatura final de carbonização nas propriedades químicas, físicas e mecânicas do carvão vegetal oriundo da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus*. Foram abatidos três indivíduos de *Corymbia citriodora* e dois híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* (VM04 e MN463). De cada indivíduo foi retirado um torete e o mesmo foi mecanicamente processado de modo a serem retiradas amostras em três posições radiais distintas para determinação da densidade básica e para a carbonização em três diferentes temperaturas finais. O carvão vegetal de *C. citriodora* apresentou maior densidade relativa aparente, teor de minerais, resistência à penetração da semiesfera de aço e tensão máxima suportada. Há uma relação direta entre a temperatura final de carbonização e os teores de carbono fixo, resistência e rigidez do carvão vegetal. Houve uma tendência de incremento da densidade relativa aparente, de resistência à penetração da semiesfera e de tensão máxima suportada do carvão vegetal no sentido medula-câmbio. Houve ainda uma tendência do carvão produzido com madeira mais próxima à medula apresentar maior teor de minerais.

Palavras-chave: variação radial, carvão, propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of radial position and final carbonization temperature on the chemical, physical and mechanical properties of charcoal from wood of *Corymbia* and *Eucalyptus*. Three individuals of *Corymbia citriodora* and two natural hybrids of *Eucalyptus urophylla* (VM04 and MN463) were cut. One short piece was removed from each individual and it was mechanically processed, so that the samples were removed at three different radial positions for the determination of basic density and for carbonization at three different final temperatures. Charcoal from *C. citriodora* had higher apparent relative density; mineral content; penetration resistance of the semi-sphere of steel and maximum tension supported. There is a direct relationship between final carbonization temperature and the contents of fixed carbon, resistance and charcoal stiffness. There was an increasing trend in apparent relative density, penetration resistance of the semi-sphere and charcoal maximum tension supported from the pith to the cambium. There was still a tendency towards a higher mineral content for the charcoal produced with the wood closest to the pith.

Keywords: radial variation; charcoal; physical, chemical and mechanical properties.

¹Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais. UEMS - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Caixa Postal, 25 - 79200-000 - Aquidauana, MS. E-mail: allan@uems.br

²Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras - Laboratório Multiusuário de Biomateriais. Câmpus UFPA. Caixa Postal, 3037 - 37200-000 - Lavras, MG. E-mail: trugilho@dcf.ufpa.br

³Pesquisador. UFPA - Universidade Federal de Lavras - Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira. Câmpus UFPA - Caixa Postal, 3037 - 37200-000 - Lavras, MG. E-mail: alfredo.napoli@cirad.fr

⁴Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras - Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira. Câmpus UFPA. Caixa Postal, 3037 - 37200-000 - Lavras, MG. E-mail: jtilima@dcf.ufpa.br

⁵Professor Associado UFPA - Universidade Federal de Lavras - Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira. Câmpus UFPA - Caixa Postal, 3037 - 37200-000 - Lavras, MG. E-mail: jreinaldo@dcf.ufpa.br

⁶Professor Substituto do Curso de Engenharia Florestal. UFG - Universidade Federal de Goiás. Regional Jataí - Câmpus Cidade Universitária - Rodovia BR-364, Km 192 - Parque Industrial - 75801-615 - Jataí, GO. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com

INTRODUÇÃO

O Brasil, na atualidade, é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo (FAO, 2014). Isso se deve ao fato do país ser um dos poucos a utilizar o carvão vegetal para fins industriais como, por exemplo, a termorredução de minério de ferro. Grande parte da produção nacional do ferro-gusa produzido utiliza o carvão vegetal como termorredutor, enquanto que nos demais países produtores utiliza-se quase que exclusivamente o carvão mineral para o mesmo objetivo.

As funções vitais do carvão no processo de termorredução do minério de ferro são basicamente: fornecer energia na forma de calor, recompor o poder redutor do dióxido de carbono, propiciar a sustentação da carga de minério de ferro e permitir a percolação gasosa pelo leito. Assim sendo, o carvão empregado no processo produtivo deve apresentar características tecnológicas que colaborem com as funções supracitadas.

Um carvão para ser considerado de boa qualidade, ou seja, que exerça com propriedade as funções dele esperadas, deve apresentar densidade aparente elevada (GOMES; OLIVEIRA, 1980), teor de carbono fixo de aproximadamente 75% (VALE et al., 2011; ASSIS; ALMEIDA; PORTO, 1982; ROCHA; KLITZKE, 1998), teor de materiais voláteis no intervalo de 20 a 25% (BRITO, 1993) e baixo teor de minerais. Compostos inorgânicos no ferro-gusa produzido causam redução da qualidade do mesmo, logo, carvão com menor teor em compostos inorgânicos são preferenciais para esta finalidade (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

Quando o objetivo é a termorredução do minério de ferro, as propriedades mecânicas do carvão vegetal tornam-se importantes parâmetros na sua qualificação. Quanto maior a resistência à compressão e rigidez do carvão, maior a capacidade de sustentação do leito no interior do alto forno siderúrgico (CETEC, 1980).

Os parâmetros físicos e químicos de qualidade do carvão vegetal são comumente estudados e avaliados por centros de pesquisa e pela iniciativa privada. Vários trabalhos científicos recentes têm sido reportados na literatura sobre a qualidade do carvão vegetal para o uso siderúrgico (OLIVEIRA et al., 2010; NEVES et al., 2011; SANTOS et al., 2011; ASSIS et al., 2012; PEREIRA et al., 2012; PEREIRA et al., 2013; REIS et al., 2012a, 2012b; PROTÁSIO et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014a, 2014b, 2014c). Já as propriedades mecânicas são alvos menos comuns de investigação, não havendo sequer uma normativa analítica que descreva e padronize ensaios mecânicos a serem aplicados no carvão vegetal. Portanto, estudos nesta temática tendem a fornecer informações de suma importância para que o carvão vegetal seja caracterizado com um maior nível de detalhamento.

A qualidade do carvão vegetal depende diretamente das propriedades físicas, químicas e anatómicas da madeira que o originou. Propriedades tais como a densidade básica (CETEC, 1980; ANTAL; MOK, 1990; BRITO, 1993; VALE; DIAS; SANTANA, 2010; COSTA et al., 2014), os teores de lignina (MARTINS, 1980; PROTÁSIO et al., 2012) e de minerais (VITAL et al., 1994; PIMENTA; BARCELOS, 2000) são as principais propriedades influentes na qualidade do carvão vegetal. Tais propriedades variam entre indivíduos de espécies distintas, em indivíduos de mesma espécie, em indivíduos de mesmo clone e até mesmo no interior de um fuste. Segundo Malan (1995), a variação radial das propriedades da madeira no interior de um fuste é a mais significativa.

Outra variável influente nas propriedades do carvão vegetal é a temperatura final do processo de carbonização (TRUGILHO; SILVA, 2001; PROTÁSIO et al., 2014c). Carbonização em temperaturas mais elevadas reflete na diminuição do rendimento gravimétrico em carvão, uma vez que a volatilização dos compostos orgânicos é mais acentuada (VIEIRA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014c).

Entretanto, temperaturas de carbonização mais elevadas melhoram a qualidade química do carvão vegetal, pois se eleva o teor de carbono fixo (PINHEIRO; FIGUEIREDO; SEYE, 2005; SYRED et al., 2006; PROTÁSIO et al., 2014b). Vieira (2009), avaliando o efeito da temperatura final de carbonização sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal, observou uma relação direta entre as variáveis mecânicas e a temperatura de carbonização.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência do material genético, da posição radial e da temperatura final de carbonização nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal.

MATERIAL E MÉTODOS

Material biológico

Neste estudo foram utilizados três materiais genéticos distintos, VM04 e MN463 (clones de híbridos naturais do *Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora*, aos sete anos de idade, plantados com espaçamento 3 m x 3 m, sendo os dois primeiros provenientes da empresa Vallourec Florestal Ltda. (Paraopeba - MG) e o último da Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA (Belo Oriente - MG).

Amostragem e preparo do material

Cada clone foi representado por três indivíduos com diâmetro médio do povoamento. De cada indivíduo foi retirado um torete de um metro de comprimento na altura da base.

Cada torete foi processado mecanicamente com o objetivo de obter um pranchão central de 4 cm de espessura e 100 cm de comprimento. Estes por sua vez foram subdivididos longitudinal e radialmente de forma a serem obtidas amostras de diferentes posições radiais (interno, intermediário e externo) destinadas à determinação da densidade básica e para a produção de carvão vegetal em três condições de carbonização, como pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1. Esquema amostral.
Figure 1. Sampling scheme.

Determinação da densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi determinada segundo normativa analítica NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

Carbonização do material

As amostras de madeira foram mecanicamente processadas de modo a serem obtidos cubos com 2 cm de aresta.

Os corpos de provas, no intuito de se evitar colapso, rachaduras e fissuras, foram secos lentamente. A carbonização da madeira, previamente seca, foi realizada em forno tipo mufla à uma taxa de aquecimento de 100°C/hora e temperaturas finais de 350, 450 e 550°C, permanecendo nestas por um período de 30 minutos.

Parâmetros de qualidade física e química do carvão vegetal

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada segundo normativa analítica utilizada na determinação da densidade básica da madeira, NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003), utilizando o mercúrio líquido na mensuração do volume.

Foi realizada a análise química imediata do carvão com intuito de determinar os teores de materiais voláteis, de minerais e de carbono fixo, por meio da norma NBR 8112 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1983).

Determinação das propriedades mecânicas do carvão vegetal

O ensaio utilizado na caracterização mecânica dos materiais carbonizados consistiu basicamente em pressionar uma semiesfera de 1 cm² de área diametral sobre o corpo de prova cúbico de carvão vegetal com aresta de 2 cm, paralelamente ao eixo longitudinal das fibras e a uma velocidade constante de 0,5 mm.min⁻¹, até que o mesmo se rompa. Dessa forma, as propriedades mecânicas do carvão vegetal foram determinadas por meio da adaptação do ensaio de dureza Janka realizado para a madeira e normalizado pela NBR 7190 (ABNT, 1997).

A medida que o ensaio se processa, a máquina de ensaio universal coleta dados de deslocamento, ou de profundidade de penetração da semiesfera, e a carga aplicada sobre o corpo de prova de carvão vegetal. Com estes dados é possível determinar a área de contato entre a semiesfera e o corpo de prova de carvão vegetal por meio da Equação 1.

$$AC = 2\pi Rh \quad (1)$$

Em que: AC: área de contato entre a semiesfera e o corpo de prova de carvão vegetal (cm²); R: raio da semiesfera (0,564 cm) e h é a profundidade de penetração da semiesfera (cm) no corpo de prova de carvão vegetal.

De posse dos dados da área de contato e da carga aplicada foi possível determinar a tensão que atua sobre o corpo de prova, em função da profundidade de penetração da semiesfera. Dessa forma, tornou-se possível determinar o comportamento característico da tensão em função da profundidade de penetração da semiesfera, o que permite determinar a tensão máxima suportada ou resistência à penetração da semiesfera de aço. A Figura 2 apresenta o comportamento da tensão em função da profundidade de penetração da semiesfera no corpo de prova de carvão vegetal.

Figura 2. Gráfico de tensão em função da penetração da semiesfera no carvão vegetal.

Figure 2. Graph of tension as related to the penetration of the semi-sphere into charcoal.

Na análise da Figura 2, nota-se um primeiro estágio no qual há uma relação constante entre o incremento de tensão e a penetração da semiesfera. Esta constante é relativa a resistência oferecida à penetração da semiesfera no carvão vegetal, sendo esta determinada conforme a Equação 2. A resistência à penetração da semiesfera poderia ser, portanto, uma medida inferencial sobre a rigidez do carvão vegetal.

No segundo estágio há uma tensão limite de resistência mecânica que o carvão vegetal suporta, a partir desta tensão ocorre o colapso da estrutura do corpo de prova iniciando-se a sua desintegração e o mesmo começa a não mais resistir a penetração da semiesfera. Mesmo após o colapso inicial o corpo de prova continua suportando carga até que se rompe por completo.

$$RP = tg\alpha = \frac{\Delta \text{tensão}}{\Delta \text{profundidade de penetração}} \quad (2)$$

Em que: RP: resistência à penetração da semiesfera no corpo de prova de carvão vegetal (MPa.mm⁻¹); tgα: tangente do ângulo α; Δ_{tensão}: variação da tensão (MPa); Δ_{profundidade de penetração}: variação da profundidade de penetração da semiesfera (mm).

Análise estatística

Para a análise estatística da densidade básica da madeira obtida dos materiais genéticos e das posições radiais, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em esquema fatorial com dois fatores, sendo três níveis para ambas as fontes de variação (materiais genéticos e posições radiais), com seis repetições por tratamento. Para comparação múltipla de médias foi utilizado o teste Scott-Knott em nível de 5% de significância.

Para a avaliação da influência da variação dos parâmetros de carbonização, dos materiais genéticos e das posições radiais sobre a qualidade do carvão vegetal foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial com três fatores, sendo três níveis para as três fontes de variação (temperaturas finais de carbonização, materiais genéticos e posições radiais), com seis repetições por tratamento. Para comparação múltipla de médias foi utilizado o teste Scott-Knott em nível de 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o resumo da análise de variância para os dados de densidade básica da madeira. Observa-se que houve diferença estatística significativa para a densidade básica da madeira para os diferentes materiais genéticos e ainda entre as posições radiais consideradas. Ainda pela Tabela 1 evidencia-se que as fontes de variação materiais genéticos e posições radiais não apresentaram comportamento interativo.

Tabela 1. Análise de variância para os dados de densidade básica da madeira.

Table 1. Analysis of variance for data on basic wood density.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Materiais genéticos (MG)	2	0,09 *
Posições radiais (PR)	2	0,03 *
MG x PR	4	0,00 ns
Erro	45	0,00
CVexp (%)		8,43

GL: Graus de liberdade; CVexp(%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

A Figura 3 apresenta o comportamento da densidade básica da madeira entre os materiais genéticos (A) e posições radiais (B). Observa-se que a madeira de *Corymbia citriodora* apresentou maior densidade básica comparada aos demais materiais genéticos e que houve uma tendência de incremento desta propriedade física no sentido medula-câmbio.

Figura 3. Valores médios de densidade básica para os materiais genéticos (A), posições radiais (B) e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figure 3. Mean basic density values for genetic materials (A), radial positions (B) and classification according to the Scott-Knott multiple comparison test ($\alpha = 0.05$).

O incremento da densidade básica no sentido medula-câmbio pode ser explicado com base em dois fenômenos. Na fase inicial de crescimento do indivíduo as células do câmbio apresentam uma maior atividade. Assim, as células produzidas não possuem o período necessário para que haja espessamento da parede celular, refletindo assim na formação de fibras de paredes mais finas (TRE-

VISAN et al., 2008). Logo, a madeira produzida nos períodos iniciais de crescimento é formada por células de paredes mais delgadas e, conseqüentemente, de menor densidade básica.

Outro fator influente no padrão de variação radial da densidade básica é proporção entre os lenhos inicial e tardio. Nas proximidades da medula ocorre a presença de uma maior proporção de lenho inicial, que apresenta uma menor densidade comparada ao lenho tardio. Portanto, há uma tendência da madeira próxima à medula apresentar uma menor densidade comparada à madeira próxima ao câmbio vascular (ZAMUDIO et al., 2002).

Santos et al. (2011), avaliando a madeira de três clones de híbridos de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade, encontraram valores de densidade básica média variando de 0,479 a 0,529 g.cm⁻³. Sette Jr. et al. (2012), avaliando o efeito da idade e posição longitudinal nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, observaram um valor de densidade básica de 0,460 g.cm⁻³ para a madeira de *Eucalyptus grandis* aos 72 meses de idade.

Os valores de densidade básica da madeira oriunda dos clones VM04 (0,503 g.cm⁻¹) e MN463 (0,471 g.cm⁻¹) encontram-se dentro das variações observadas pelos autores anteriormente citados. A madeira de *C. citriodora* apresentou densidade superior (0,606 g.cm⁻³) em relação às literaturas mencionadas, o que caracteriza esse material genético como sendo o mais propício à produção de carvão vegetal de uso siderúrgico.

A Tabela 2 apresenta o resumo da análise de variância dos parâmetros de qualidade do carvão vegetal. Observa-se que houve comportamento interativo entre as fontes de variação materiais genéticos e posições radiais para a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Observa-se ainda que para os teores de materiais voláteis e carbono fixo houve um comportamento interativo entre os materiais genéticos e as temperaturas finais de carbonização. Para o teor de minerais houve efeito significativo das temperaturas finais de carbonização e o efeito dos materiais genéticos e das posições radiais foi interativo.

A tensão máxima suportada pelo carvão sofreu influência significativa das três fontes de variação, observando-se também significância entre material genético e posição radial de amostragem.

Tabela 2. Análise de variância dos parâmetros de qualidade do carvão vegetal.

Table 2. Analysis of variance for the quality parameters of charcoal.

Fonte de Variação	GL	Quadrado médio						
		DRA	Voláteis	Carbono Fixo	Minerais	TMS	RP	
Materiais genéticos (MG)	2	0,25 *	6,85 ns	11,41 *	4,42 *	782,29 *	3596,22 *	
Posições radiais (PR)	2	0,21 *	1,32 ns	6,46 ns	1,97 *	1214,74 *	4464,02 *	
Temperatura de Carbonização (TC)	2	0,00 ns	7699,46 *	7579,71 *	0,76 *	146,54 *	794,36 *	
MG x PR	4	0,01 *	0,54 ns	1,55 ns	0,59 *	61,59 *	80,39 ns	
MG x TC	4	0,00 ns	20,49 *	23,17 *	0,24 ns	19,34 ns	100,26 ns	
PR x TC	4	0,00 ns	0,93 ns	1,27 ns	0,04 ns	26,47 ns	172,22 ns	
MG x PR x TC	8	0,00 ns	0,42 ns	0,34 ns	0,02 ns	13,02 ns	98,27 ns	
Erro	135	0,00	3,65	3,64	0,13	21,65	120,24	
CVexp (%)		14,74	6,98	2,65	47,00	22,4	42,39	

GL: Graus de liberdade; DRA: Densidade relativa aparente; TMS: Tensão máxima suportada; RP: Resistência à penetração da semiesfera; CV_{exp}: Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

A Figura 4 apresenta o padrão de variação radial da densidade relativa aparente do carvão vegetal para os três materiais genéticos. Observa-se que a densidade relativa aparente do carvão vegetal de *C. citriodora* foi mais elevada quando comparada aos demais materiais. Observa-se ainda que há uma tendência da madeira mais próxima à medula produzir um carvão com menor densidade relativa aparente.

Figura 4. Efeito da posição radial dentro de cada material genético para a variável densidade relativa aparente.
Figure 4. Effect of the radial position within each genetic material for the variable apparent relative density.

O comportamento observado pode ser explicado com base na densidade básica dos materiais genéticos (Figura 3). Vital, Jesus e Valente (1986) e Vale et al. (2010) mencionaram que houve uma correlação positiva entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e a densidade básica da madeira que lhe deu origem. Logo, a variação radial da densidade relativa aparente do carvão vegetal deve assemelhar-se ao padrão de variação radial da densidade básica.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de densidade relativa aparente do carvão vegetal das posições radiais em cada material genético e classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott.

Tabela 3. Efeito da posição radial em cada material genético para as variáveis: densidade relativa aparente, teor de minerais e tensão máxima suportada do carvão vegetal. Classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott.

Table 3. Effect of the radial position on each genetic material for the variables: apparent relative density, mineral content and maximum tension supported by charcoal. Classification according to the Scott-Knott multiple comparison test.

Materiais genéticos	Posições radiais	Densidade Relativa Aparente (g.cm ⁻³)	Teor de Minerais (%)	Tensão Máxima Suportada (MPa)
<i>C. citriodora</i>	Externo	0,494 C	0,66 A	29,75 C
	Intermediário	0,424 B	1,22 B	23,64 B
	Interno	0,370 A	1,39 B	19,13 A
MN463	Externo	0,383 B	0,52 A	22,74 B
	Intermediário	0,248 A	0,64 A	12,38 A
	Interno	0,262 A	0,87 B	14,85 A
VM04	Externo	0,394 B	0,51 A	26,14 B
	Intermediário	0,306 A	0,53 A	19,65 A
	Interno	0,291 A	0,58 A	18,61 A

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

O padrão de variação radial da densidade relativa aparente do carvão vegetal observado neste estudo assemelha-se aos encontrados por Trugilho et al. (2005), em trabalho com híbridos naturais de *Eucalyptus* aos sete anos de idade, e Arantes et al. (2013), em estudo com *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake aos 6 anos de idade.

A Figura 5 apresenta o comportamento dos teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão produzido com os três materiais genéticos para cada temperatura final de carbonização. A Tabela 4 apresenta os valores médios das variáveis em questão juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figura 5. Desdobramento da interação entre as fontes de variação materiais genéticos e temperaturas finais de carbonização para as variáveis: teor de materiais voláteis (A) e teor de carbono fixo (B).

Figure 5. Decomposition of the interaction between the sources of variation genetic materials and final carbonization temperatures for the variables: content of volatile materials (A) and content of fixed carbon (B).

Tabela 4. Efeito da temperatura final de carbonização em cada material genético para as variáveis: teor de carbono fixo e teor de materiais voláteis do carvão vegetal. Classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott.

Table 4. Effect of the final carbonization temperature on each genetic material for the variables: content of fixed carbon and volatiles in charcoal. Classification according to the Scott-Knott multiple comparisons test.

Material	Temperaturas finais de carbonização (°C)	Teor de Voláteis(%)	Teor de Carbono Fixo (%)
<i>C. citriodora</i>	350	39,94 A	59,04 A
	450	26,65 B	72,13 B
	550	15,22 C	83,75 C
MN463	350	38,41 A	61,12 A
	450	28,75 B	70,42 B
	550	16,12 C	83,15 C
VM04	350	39,71 A	59,88 A
	450	26,42 B	73,08 B
	550	15,07 C	84,23 C

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

O carvão produzido a 550°C praticamente não apresentou variação no teor de materiais voláteis e carbono fixo entre os materiais genéticos. O carvão oriundo do clone MN463 apresentou menores e maiores teores de compostos voláteis e carbono fixo, respectivamente, quando a temperatura final de carbonização foi de 350°C. No entanto, um comportamento inverso foi observado quando os materiais foram carbonizados a 450°C. Quanto mais elevada a temperatura final de carbonização menor será a concentração de materiais voláteis e maior será a concentração de carbono fixo presente no carvão vegetal.

Trugilho e Silva (2001), avaliando o efeito das temperaturas finais de carbonização no carvão oriundo da madeira de *Hymenaea courbaril* (jatobá), observaram valores no teor de materiais voláteis no carvão vegetal variando de 40,13 a 23,24% para as temperaturas finais de carbonização de 400 e 600°C, respectivamente. No mesmo estudo o teor de carbono fixo variou de 58,91 a 75,72% para as mesmas temperaturas finais de carbonização. Os valores nos teores de materiais voláteis e carbono fixo observados neste estudo estão dentro do intervalo apresentado pela literatura citada.

A Figura 6 apresenta o comportamento da concentração de compostos inorgânicos no carvão vegetal em função das temperaturas finais de carbonização. O teor de minerais no carvão vegetal foi menor quando a temperatura final de carbonização foi de 350°C.

Figura 6. Valores médios de concentração em minerais para fonte de variação temperaturas finais de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figure 6. Mean values of mineral content for the variable final carbonization temperature; classification according to the Scott-Knott multiple comparison test ($\alpha = 0.05$).

Quanto maior a temperatura final de carbonização mais intensa será a liberação de compostos voláteis. Tal fato reflete no incremento do teor dos compostos inorgânicos e carbono fixo na fase sólida durante o processo de carbonização. Portanto, processos de carbonização que utilizam temperaturas finais de carbonização mais elevadas darão origem a um carvão com menor teor de compostos voláteis e maiores teores de carbono fixo e minerais.

A Figura 7 apresenta o padrão de variação radial do teor de minerais do carvão vegetal oriundo dos três materiais genéticos estudados.

Figura 7. Padrão de variação radial da concentração de minerais do carvão vegetal oriundo dos três materiais genéticos estudados.

Figure 7. Standard radial variation of the mineral content in charcoal from the three studied genetic materials.

Não houve diferença estatística significativa no teor de minerais do carvão nas posições radiais do clone VM04 (Tabela 3). Para os demais materiais, o carvão produzido com a madeira mais próxima à medula apresentou maior teor de minerais comparado ao carvão produzido com madeira mais próxima ao câmbio vascular. Não foi possível observar um padrão de variação radial característico do teor de minerais no carvão vegetal dos três materiais genéticos avaliados. Porém, observou-se uma tendência de que o carvão produzido com a madeira mais próxima da medula apresentou maior teor de minerais.

A Figura 8 apresenta o comportamento da tensão máxima suportada em função das temperaturas finais de carbonização. Observa-se que há uma tendência do carvão vegetal ser mais resistente à penetração da semiesfera com o aumento da temperatura final do processo de carbonização.

Figura 8. Valores médios de tensão máxima suportada para fonte de variação temperaturas finais de carbonização e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figure 8. Mean values of maximum tension supported for the variable final carbonization temperature; classification according to the Scott-Knott multiple comparison test ($\alpha = 0.05$).

O incremento na tensão máxima suportada pelo carvão em decorrência do aumento da temperatura final de carbonização é possivelmente devido à alteração química estrutural ou rearranjo molecular que a biomassa sofre na presença de altas temperaturas. Com o aumento da temperatura há um aumento da cristalinidade das cadeias carbônicas e das ligações entre as mesmas. Portanto, há uma tendência de que as propriedades mecânicas do carvão vegetal sejam melhoradas quanto mais elevadas as temperaturas finais de carbonização (BLANKENHORN; JENKINS; KLINE, 1972; VIEIRA, 2009).

Blankenhorn, Jenkins e Kline (1972) e Vieira (2009) mencionaram que a degradação térmica da lignina é semelhante à formação do carbono vítreo a partir de resinas fenólicas. Os autores afirmaram que com o aumento da temperatura, há uma reestruturação das cadeias de carbono fazendo com que as mesmas se tornem semelhantes às estruturas grafíticas com ligações cruzadas entre elas. Relataram ainda que em temperaturas extremas há uma maior organização das cadeias de carbono já reestruturado, isso associado ainda a um maior número de ligações entre as cadeias carbônicas. Fenômeno semelhante foi descrito por Mendes, Gomez e Oliveira (1982).

Vieira (2009), avaliando a influência da temperatura final de carbonização sobre as propriedades mecânicas do carvão vegetal, observou valores de resistência à compressão paralela às fibras variando de 7 a 142 MPa para as temperaturas finais de carbonização de 350 e 550°C, respectivamente. Os valores observados neste estudo encontram-se dentro do intervalo da literatura citada. Entretanto, os parâmetros e o tipo de ensaio mecânico utilizado por Vieira (2009) foram distintos ao ensaio utilizado neste estudo.

A Figura 9 apresenta o padrão de variação radial da tensão máxima suportada pelo carvão vegetal para os três materiais genéticos. Observa-se que o carvão produzido com a madeira retirada na posição mais externa do fuste, em todos os materiais, suportou maior tensão à penetração da semiesfera comparado ao carvão produzido com a madeira mais próxima ao câmbio (Tabela 3 e Figura 9).

Figura 9. Padrão de variação radial da tensão máxima suportada do carvão vegetal para cada material genético.

Figure 9. Standard radial variation of the maximum tension supported of charcoal for each genetic material.

O incremento da tensão máxima suportada pelo carvão vegetal no sentido medula-câmbio (Tabela 3 e Figura 8) pode ser explicado com base na densidade relativa aparente do carvão vegetal. Um carvão vegetal de maior densidade tende a suportar maior tensão. A maior resistência à penetração da semiesfera de carvões de maior densidade relativa aparente ocorre, possivelmente, devido a um maior número de cadeias carbônicas por unidade de volume presente em um carvão com maior densidade relativa aparente. Outro fator explicativo pode estar relacionado com a presença de trincas. Um carvão mais denso, visualmente, apresenta menor quantidade de fissuras, o que possivelmente contribui com a melhoria das suas propriedades mecânicas.

Cabe ressaltar ainda que, aspectos anatômicos da madeira, como a espessura da parede das fibras, influencia diretamente a sua densidade e, conseqüentemente, a densidade relativa aparente do carvão vegetal e a sua resistência à penetração da semiesfera.

Vieira (2009), avaliando as propriedades mecânicas do carvão vegetal produzido com madeira de *Eucalyptus* amostrada em diferentes posições radiais, encontrou o mesmo comportamento da variação radial da tensão máxima suportada observado neste estudo. O autor ainda encontrou valores de resistência à compressão de 128 e 159 MPa para o carvão produzido em 550°C a partir da madeira do clone VM01 amostrada próxima à medula e alburno, respectivamente. Os valores de resistência à compressão observados pelo autor foram superiores aos observados neste estudo, ressaltando que isso ocorreu devido às diferenças entre os ensaios mecânicos realizados.

Moutinho (2013), avaliando as propriedades mecânicas do carvão vegetal produzido com diferentes espécies de *Eucalyptus*, observou valores de tensão máxima suportada variando de 7,32 a 15,69 MPa em compressão paralela.

A Figura 10 apresenta o comportamento da resistência à penetração da semiesfera em função do material genético (A), posições radiais (B) e temperaturas finais de carbonização (C), juntamente com a classificação segundo o teste de comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figura 10. Valores médios de resistência à penetração da semiesfera no carvão vegetal para os materiais genéticos (A), posições radiais (B) e temperaturas finais de carbonização (C) juntamente com a classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

Figure 10. Values of penetration resistance of the semi-sphere into charcoal for the genetic materials (A), radial positions (B) and final carbonization temperatures (C); classification according to the Scott-Knott multiple comparison test ($\alpha = 0.05$).

Observa-se que a resistência à penetração da semiesfera do carvão vegetal produzido com a madeira de *C. citriodora* foi maior comparada ao carvão produzido com a madeira dos demais materiais. Há uma clara tendência de incremento da resistência à penetração da semiesfera no carvão vegetal no sentido medula-câmbio. Observa-se ainda que o carvão produzido a 450 e 550°C é mais rígido comparado ao carvão produzido com a temperatura de 350°C.

A forma pela qual foi discutido o comportamento da tensão máxima suportada pelo carvão vegetal em função dos materiais genéticos, posições radiais e temperaturas finais de carbonização pode ser utilizada para elucidar os fenômenos observados para a variável resistência à penetração

da semiesfera. Materiais genéticos que apresentam maior densidade básica produzem carvão vegetal mais rígido quando carbonizados. Devido à madeira mais próxima ao câmbio apresentar maior densidade básica, há uma tendência do carvão apresentar maior densidade relativa aparente e, conseqüentemente, maior rigidez. Quanto maior a temperatura final de carbonização maior será o rearranjo e organização das cadeias carbônicas conferindo ao carvão maior rigidez.

Moutinho (2013) observou valores em módulo de elasticidade do carvão vegetal variando de 316 a 736 MPa. Vieira (2009), por sua vez, observou valores da mesma variável variando de 332 a 762 MPa, valores esses muito superiores aos observados neste estudo. Tal discrepância nos valores observados deve-se, provavelmente, às diferenças quanto às metodologias dos ensaios empregados. Os autores supracitados realizaram o teste de compressão paralela às fibras no carvão vegetal, que necessita de usinagem das peças, e não o ensaio de resistência à penetração da semiesfera.

Além disso, no teste de compressão paralela às fibras não há um controle da área de aplicação da tensão devido à deformação do corpo de prova. Dessa forma, há a necessidade de normalização de métodos específicos para avaliar a resistência mecânica do carvão vegetal.

CONCLUSÕES

O carvão vegetal de *Corymbia citriodora* apresentou valores superiores em densidade relativa aparente, teor de minerais, resistência à penetração da semiesfera e tensão máxima suportada. Logo, apesar do maior teor de minerais, poderia ser o mais indicado para o uso siderúrgico.

Há uma relação direta entre a temperatura final de carbonização e teor de carbono fixo, teor de minerais, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semiesfera no carvão vegetal. Há uma relação inversa entre a temperatura de carbonização e o teor de compostos voláteis.

Foi observada a tendência de incremento da densidade relativa aparente, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semiesfera no sentido medula-câmbio.

O carvão produzido com madeira retirada mais próxima da medula apresentou maior teor de minerais.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, CAPES e Fapemig pelo auxílio financeiro e as empresas Vallourec Florestal Ltda. e Celulose Nipo-Brasileira pela doação das madeiras utilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ANTAL, M. J.; MOK, W. S. L. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. *Energy & Fuels*, Washington, v. 4, n. 3, p. 221-225, 1990.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSIS, P. S.; ALMEIDA, L. Z.; PORTO, F. M. **Utilização do carvão vegetal na siderurgia: produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 318 p.

BLANKENHORN, P. R.; JENKINS, G. M.; KLINE, D. E. Dynamic mechanical properties and microstructure of some carbonized hardwoods. **Wood and Fiber**, Lawrence, v. 4, n. 3, p. 212-224, 1972.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).

CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980. 158 p. (Série de Publicações Técnicas, 001).

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Produção mundial de carvão vegetal**. Disponível em: . Acesso em: 14 abr. 2014.

GOMES, E. O.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W. r. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 27-42.

MALAN, F. A. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 9-26.

MENDES, M. G.; GOMEZ, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. In: CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p. 91-112.

MOUTINHO, V. H. P. **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. 2013. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p. 62-73.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, G. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, Raleigh, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. V. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, New York, v. 2012, p. 1-8, 2012.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização e carvão vegetal**. Viçosa: UFV, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P. C. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; GODINHO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014a.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M. G. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 435-444, 2014b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; SILVA, M. G.; COUTO, A. M. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 3, p. 189-196, 2014c.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012a.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012b.

ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. **Energia da madeira**. Curitiba: FUPEF, 1998. 86 p. (Série Didática).

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SETTE JR., C. R.; OLIVEIRA, I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A. J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. A clean efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, London, v. 85, n. 10/11, p. 1566-1578, 2006.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Variação radial da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, 2008.

- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperaturas finais de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril*). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n.1, p. 137- 145, 2010.
- VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta do pinhão-manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.
- VIEIRA, R. S. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão produzido entre 350 e 900°C**. 2009. 80 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.
- VITAL, B. R.; ALMEIDA, J.; VALENTE, O. F.; PIRES, I. E. Características de crescimento das árvores e da qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **IPEF**, Piracicaba, n. 47, p. 22-28, 1994.
- VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1986.
- ZAMUDIO, F. BAETTYG, R.; VERGARA, A.; GUERRA, F.; ROZENBERG, P. Genetic trends in wood density and radial growth with cambial age in a radiate pine progeny test. **Annals of Forest Science**, Les Ullis, v. 59, n. 5/6, p. 541-549, 2002.

Recebido em 30/09/2014

Aceito para publicação em 21/05/2015