

## Potencial energético de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* cultivados no Estado do Rio de Janeiro

Energetic potential of seven *Eucalyptus* genetic materials planted in Rio de Janeiro State

Ananias Francisco Dias Júnior<sup>1</sup>, Azarias Machado de Andrade<sup>2</sup>,  
Vítor Werneck Soares<sup>3</sup>, Djailson Silva Costa Júnior<sup>4</sup>,  
Dereck Halley Anthony Alves Ferreira<sup>5</sup> e Paulo Sérgio dos Santos Leles<sup>2</sup>

### Resumo

O trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal derivados de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* sp aos sete anos de idade. Foram avaliados a densidade básica, o poder calorífico da madeira e os rendimentos em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e em carbono fixo, massa específica aparente, teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinza e poder calorífico do carvão vegetal. Para as avaliações físico-químicas e térmicas da madeira utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com sete tratamentos e seis repetições. Realizou-se ainda a análise multivariada de componentes principais. Os resultados obtidos demonstraram o potencial de uso dos materiais genéticos de *Eucalyptus* sp para uso energético e produção de carvão vegetal. Porém, os resultados obtidos para o Clone Branco não o indicaram como espécie apta para uso energético.

**Palavras-chave:** Energia de biomassa, carvão vegetal, clones de *Eucalyptus* sp.

### Abstract

This research aimed to evaluate the energy potential of wood and charcoal derived from seven genetic materials of *Eucalyptus* sp. at seven years of age. Were evaluated the basic density, the calorific value of the wood and the yields of charcoal in pyroigneous liquid, non-condensable gases and fixed carbon, bulk density, fixed carbon, volatiles and ash and calorific value of charcoal. To evaluate the physical, chemical and thermal properties of wood a completely randomized design with seven treatments and six replications was used. The multivariate principal component analysis was done. The results demonstrated the potential use of genetic materials of *Eucalyptus* sp. for energy use and charcoal production. However, the results obtained for the "Clone White" did not indicate it as being a good species for energy use.

**Keywords:** Biomass energy, charcoal, clones of *Eucalyptus* sp.

## INTRODUÇÃO

O uso da madeira proveniente de plantios comerciais é um importante suprimento de energia primária, principalmente no uso doméstico e industrial. O relatório da Agência Internacional de Energia (WEC, 2013) apresenta informações estatísticas indicando que a madeira destinada para energia soma mais da metade da biomassa florestal consumida mundialmente, em especial nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

De acordo com Brasil (2013), o consumo brasileiro total de lenha e carvão vegetal no ano de 2012 representou aproximadamente 8,3% da matriz energética nacional. Segundo este mesmo estudo, o país apresenta, simultaneamente, a maior produção e o maior consumo mundial de carvão

<sup>1</sup>Doutorando em Recursos Florestais. USP - Universidade de São Paulo / ESALQ - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Av. Pádua Dias, 11 - 13418-900 - Piracicaba, SP - E-mail: [ananiasjr@usp.br](mailto:ananiasjr@usp.br)

<sup>2</sup>Professor Associado do Instituto Florestal. UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Campus da UFRRJ - BR 465, Km 7 - 23890-000 - Seropédica, RJ - E-mail: [azarias@ufrj.br](mailto:azarias@ufrj.br); [pleles@ufrj.br](mailto:pleles@ufrj.br)

<sup>3</sup>Graduação em Engenharia Florestal. UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Instituto Florestal. Campus da UFRRJ - BR 465, Km 7 - 23890-000 - Seropédica, RJ - E-mail: [werneck.florestal@gmail.com](mailto:werneck.florestal@gmail.com)

<sup>4</sup>Professor Substituto. UFRS - Universidade Federal Rural do Semi-Árido - ESAM - Escola Superior de Agricultura de Mossoró. Presidente Costa e Silva - 59625-900 - Mossoró, RN. E-mail: [djailson\\_junior@hotmail.com](mailto:djailson_junior@hotmail.com)

<sup>5</sup>Mestrando em Ciências Ambientais e Florestais. UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Instituto Florestal. Campus da UFRRJ - BR 465, Km 7 - 23890-000 - Seropédica, RJ. E-mail: [dhaferreira@gmail.com](mailto:dhaferreira@gmail.com)

vegetal, sendo que mais de dois terços são utilizados como redutor no setor siderúrgico, sobretudo no estado de Minas Gerais. Outros usos também são comuns, como o consumo residencial (coção), indústrias cimenteira e de bebidas, indústria farmacêutica, fabricação de filtros e purificadores de água, produção de máscaras e protetores contra gases e poeiras, dentre outras utilizações.

O carvão vegetal pode ser produzido a partir da biomassa vegetal, onde a utilização de materiais lenhosos oriundos de florestas plantadas do gênero *Eucalyptus* permite a produção de um carvão mais homogêneo e com boas propriedades. Segundo a BRACELPA (2010), 84% das florestas plantadas no Brasil correspondem a cultivos de eucalipto. De acordo com a ABRAF (2013), em 2012 a área plantada com esta cultura no país totalizou 5,11 milhões de hectares, sendo que 53% estavam concentrados na região sudeste.

No estado do Rio de Janeiro o cultivo de eucalipto é insuficiente para suprir as necessidades. A área ocupada com reflorestamentos de eucalipto é de 18,4 mil hectares, o que corresponde a 0,42% da área total do Estado, e menos de 0,1% da área de florestas plantadas no país (PAULA, 2012). O Rio de Janeiro se destaca no cenário nacional, sendo um grande importador de madeira e derivados para os mais diversos fins do setor econômico (POYRY SILVICONSULT, 2012), dentre eles o carvão vegetal. Nos ramos industrial e doméstico se destacam madeiras para a construção civil, bem como para a geração de vapor e energia térmica, com destaque para a cidade de Campos dos Goytacazes, onde se aglomeram 16% das indústrias do Estado, e um importante pólo das indústrias de cerâmica.

Um dos primeiros plantios de eucaliptos do estado do Rio de Janeiro situa-se na região sul do Estado, atualmente com cerca de 10 anos de idade. Esse e outros plantios carecem de estudos que busquem avaliar o potencial da madeira e de seus derivados para futuras aplicações. A qualidade da madeira é um fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e elevada qualidade. Características como densidade básica, poder calorífico, constituição química e umidade estão entre as principais para seleção da madeira para fins energéticos.

Segundo Oliveira et al. (2010) o estabelecimento de florestas energéticas para a produção de carvão vegetal envolve a seleção de material genético superior e adoção de técnicas silviculturais adequadas, aliando a produtividade das florestas à qualidade desejada da madeira. O rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso de madeira mais densa, de maior poder calorífico e composição química adequada, resultando também em um carvão de melhor qualidade (PALUDZYSYN FILHO, 2008). A possibilidade da redução da idade de rotação tem sido analisada por empresas que produzem carvão vegetal. Em média, o corte tem ocorrido aos seis ou sete anos e, já são avaliados os resultados de cortes aos cinco anos. No entanto, é preciso saber o quanto se pode reduzir este período sem prejudicar a qualidade da madeira para este fim (OLIVEIRA et al., 2010).

De acordo com Santos et al. (2011), o processo de carbonização ou pirólise lenta da madeira consiste no seu aquecimento em temperaturas acima de 200°C, na presença controlada de oxigênio, promovendo modificações dos seus componentes. Durante a carbonização ocorre uma sequência de reações químicas e físicas dependentes do tempo e da temperatura e como resultado há o desprendimento de vapor d'água, líquidos orgânicos, gases condensáveis e não condensáveis, restando como produto o carvão vegetal.

As propriedades do carvão vegetal são bastante variáveis, pois sofrem a influência direta da matéria prima que lhe deu origem e do processo de carbonização, aspectos de difícil controle. São muitas as variáveis da madeira que influenciam a qualidade do carvão vegetal, tais como: idade, percentagem de cerne e alburno, teor de extrativos, teor de lignina total, entre outras. Madeiras originárias de espécies com idade mais avançada apresentam maior densidade e dão origem a carvão vegetal mais denso. Portanto, deve-se considerar a densidade básica da madeira e a idade da árvore na escolha dos melhores materiais genéticos para a produção de carvão vegetal (CASTRO, 2011; PROTÁSIO et al., 2014). Essas características devem estar necessariamente associadas a uma alta produtividade, que é um caráter mais complexo e de obtenção mais difícil (CASTRO et al., 2013).

Baseando-se na relevância da madeira e do carvão vegetal para o estado do Rio de Janeiro e demais regiões do país, o presente estudo teve por objetivo avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. coletados no município de Paty do Alferes, RJ.

## MATERIAL E MÉTODOS

O povoamento florestal foi instalado em dezembro de 2005 em uma área pertencente à empresa Rigotex Têxtil, no município de Paty do Alferes, RJ. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cw subtropical, com chuvas no verão e estiagem no inverno. A precipitação média anual, para os anos de 2006 a 2012 (período do experimento) foi 1.228 mm, segundo dados da estação meteorológica da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (PESAGRO), localizada em Paty do Alferes.

### Materiais genéticos e amostragem

Os tratamentos foram constituídos por sete materiais genéticos, cujas descrições encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Materiais genéticos utilizados na área experimental em Paty do Alferes – RJ.

**Table 1.** Genetic materials used in the experimental area at Paty Alferes – RJ.

Material Genético	Procedência	DAP* (cm)	HT** (m)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Anhembí, SP	[15,6 - 16,0]	[23,1 - 25,2]
<i>Eucalyptus pellita</i>	Anhembí, SP	[8,2 - 11,4]	[14,9 - 18,3]
<i>Eucalyptus saligna</i>	Anhembí, SP	[13,3 - 18,3]	[18,8 - 22,0]
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Anhembí, SP	[13,6 - 15,0]	[19,8 - 23,3]
<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	Itirapina, SP	[12,5 - 16,0]	[15,8 - 22,2]
Clone Amarelo – <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	Itirapina, SP	[13,8 - 15,0]	[22,4 - 25,2]
Clone Branco – <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	Itirapina, SP	[13,7 - 14,5]	[22,5 - 24,3]

\*Diâmetro a 1,30 m do solo; \*\*Altura total aos sete anos de idade.

As sementes dos materiais genéticos foram adquiridas junto ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais de Piracicaba (IPEF). As coordenadas geográficas, em um ponto central do plantio, são 22° 17' 57.80" S e 43° 16' 19.65" O, a uma altitude de 706 m. O plantio experimental foi instalado com 21 unidades amostrais de 35 mudas (5 linhas por 7 covas de plantio), espaçamento 3 x 2 m correspondendo à área de 0,45 hectare.

No momento do corte, os indivíduos possuíam sete anos de idade onde foram selecionados aleatoriamente dois indivíduos em cada unidade amostral, para a caracterização de cada um dos sete materiais genéticos estudados, totalizando 42 indivíduos. Após o abate, foram retirados seis discos de madeira de cada material genético, com aproximadamente três centímetros de espessura. Os discos foram retirados segundo descrições de Andrade (1993) nas seguintes alturas do fuste: o primeiro a 0,3 m do solo, o segundo a 1,30 m (à altura do peito) e os quatro restantes a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Ainda no campo, o material foi acondicionado em embalagens plásticas devidamente identificadas, sendo em seguida encaminhados ao Laboratório de Energia da Madeira do Departamento de Produtos Florestais, no Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. No laboratório os discos foram quarteados para as análises físicas e termoquímicas.

### Pirólise dos materiais lenhosos

As amostras de madeira pertencentes a duas cunhas opostas entre si com casca foram cavaqueadas e secas até 0% de umidade em uma estufa regulada a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ . Em seguida, amostras do material a.s. (absolutamente seco) foram submetidas ao processo de pirólise no interior de um cadinho metálico acondicionado no interior de um forno mufla, partindo-se da temperatura inicial de  $30^\circ\text{C}$  até a temperatura de  $500^\circ\text{C}$ . O carvão vegetal e o líquido pirolenhoso obtidos foram quantificados e devidamente armazenados. Os gases não condensáveis, com alguns constituintes inflamáveis na sua composição, foram queimados na saída do sistema de condensação e quantificados por diferença de massa.

Com as respectivas massas de cada um desses produtos foi possível determinar os rendimentos gravimétricos em carvão, em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis. O rendimento em carbono fixo foi calculado mediante o produto do rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o teor de carbono fixo.

### **Densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal**

Duas cunhas opostas, remanescentes de cada disco, foram utilizadas na determinação da densidade básica ponderada da árvore (lenho), em  $\text{g.cm}^{-3}$ , pelo método hidrostático, conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada de acordo com a mesma norma.

### **Análise química imediata do carvão vegetal**

A análise química imediata do carvão vegetal foi conduzida de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo.

A fração denominada material volátil é liberada durante o aquecimento do carvão vegetal, sendo constituída por moléculas de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e hidrocarbonetos. Outra quantidade de carbono permanece relativamente intacta e como não sai junto com o material volátil, recebe a denominação de carbono fixo. Na prática determina-se o teor de material volátil e carbono fixo aquecendo-se o carvão em temperatura em torno de  $950^\circ\text{C}$ .

A cinza é o resíduo de óxidos minerais obtidos pela combustão completa do carvão. Para assegurar a combustão completa o carvão permanece na mufla por um período de 6 horas, sob temperatura de  $750^\circ\text{C}$ . O resíduo oxidado obtido é calculado como teor de cinza do carvão vegetal.

### **Determinação do poder calorífico da madeira e do carvão vegetal**

Foi determinado o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) da madeira e do carvão vegetal, provenientes dos sete materiais genéticos avaliados. A análise do poder calorífico superior consistiu na determinação da quantidade de calor liberada pela combustão da madeira ou do carvão vegetal, no reator de uma bomba calorimétrica (adiabática), conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). O PCI em base seca, foi calculado com o auxílio da Equação 1, desconsiderando a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada durante a combustão da madeira.

$$PCI_{\text{kcal/kg}} = (PCS - 25,11 \times U) / [(100 + U) \times 100] \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: U = umidade (%).

### **Análise dos dados**

Para a análise dos dados referentes às propriedades físico-químicas e térmicas da madeira e do carvão vegetal utilizou-se um delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos (materiais genéticos) e seis repetições (árvores-amostras). Inicialmente os dados obtidos foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados. Para verificar a proximidade das variâncias foi aplicado o teste de Levene, pois duas das suposições para análise de variância é a presença de normalidade dos dados e que as variâncias sejam próximas para a categoria analisada. Em seguida, realizou a análise de variância (ANOVA) e, quando ocorrido diferença significativa, as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade.

Realizou-se a análise multivariada de componentes principais (ACP) a fim de explicar a estrutura de variância do vetor aleatório composto pelas características avaliadas na madeira e no carvão dos materiais genéticos estudados, conforme descrições de Mingoti (2005) e Manly (2008). Foram consideradas as médias de cada variável de cada árvore. Para a análise das componentes principais utilizou-se a matriz de correlação dos dados. As combinações lineares estabelecidas foram interpretadas por meio dos autovetores normalizados e das correlações entre as variáveis originais e as componentes principais. As análises foram realizadas com auxílio do software Minitab 16.6®.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RCV), líquido pirolenhoso (RLP), gases não condensáveis (RGNC) e carbono fixo (RCF).

**Tabela 2.** Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RCV), líquido pirolenhoso (RLP), gases não condensáveis (RGNC) e carbono fixo (RCF).

**Table 2.** Gravimetric charcoal yields (RCV), pyro ligneous liquid (RLP), non-condensate gases (RGNC) and fixed carbon (RCF).

Material Genético	RCV (%)	RLP (%)	RGNC (%)	RCF (%)
<i>Eucalyptus grandis</i>	23,45 b	45,41 a	31,13 b	21,84 a
Erro Padrão	±0,348	±0,799	±0,462	±0,046
<i>Eucalyptus pellita</i>	24,04 b	43,63 ab	32,32 ab	21,51 a
Erro Padrão	±0,244	±0,726	±0,807	±0,130
<i>Eucalyptus saligna</i>	25,70 a	42,27 ab	32,02 ab	22,23 a
Erro Padrão	±0,142	±0,761	±0,774	±0,106
<i>Eucalyptus urophylla</i>	23,83 b	44,31 ab	31,85 b	21,45 a
Erro Padrão	±0,211	±0,571	±0,582	±0,106
<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	23,26 b	40,55 b	36,18 a	20,52 ab
Erro Padrão	±0,248	±0,571	±0,697	±0,123
Clone Amarelo – <i>Eucalyptus urograndis</i>	23,52 b	42,96 ab	33,51 ab	21,36 a
Erro Padrão	±0,286	±0,967	±0,884	±0,127
Clone Branco – <i>Eucalyptus urograndis</i>	23,09 b	44,62 ab	32,28 ab	19,23 b
Erro Padrão	±0,103	±0,325	±0,328	±0,060

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste Tukey.

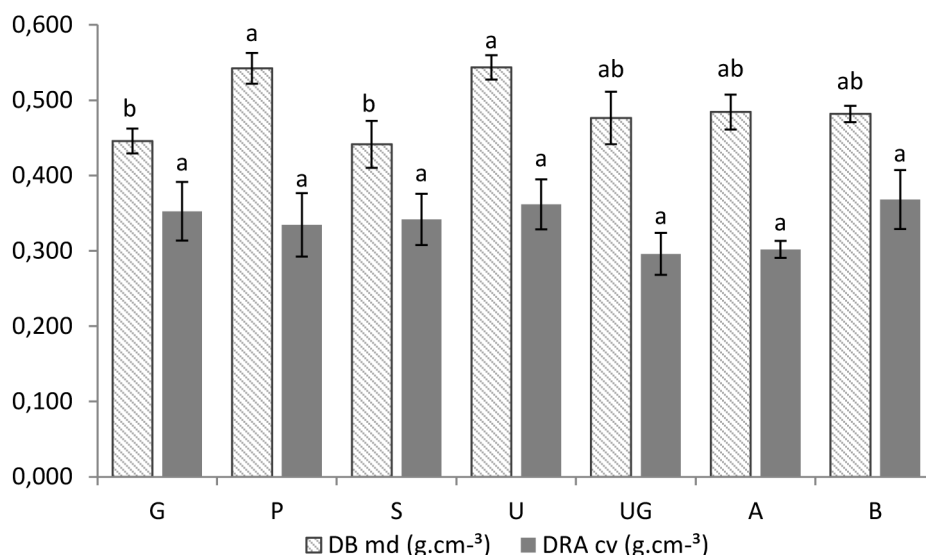
Dentre os materiais genéticos avaliados, o *E. saligna* apresentou o maior valor médio de rendimento em carvão vegetal (25,70%). Os demais valores para os materiais genéticos variaram entre 23,09 a 24,04%, não diferindo estatisticamente entre si.

Quanto ao rendimento em líquido pirolenhoso observou-se diferença estatística entre *E. grandis* e *E. urophylla* x *E. grandis*, dentro dos quais apresentaram a maior e a menor média respectivamente, em relação aos demais materiais genéticos. Espera-se que quanto maior for o rendimento em carvão vegetal e em líquido pirolenhoso, menor seja o rendimento em gases não condensáveis. Dessa forma, observou-se que os valores médios em gases não condensáveis apresentaram a mesma tendência do líquido pirolenhoso; diferenças significativas entre os materiais *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. grandis* com maior e menor médias, respectivamente.

Quanto ao rendimento em carbono fixo, o menor valor médio foi observado para o Clone Branco, que apresentou o mesmo comportamento para rendimento em carvão vegetal e teor de carbono fixo (Figura 2). Altos valores de rendimento em carbono fixo devem ser considerados com o intuito de utilizar um clone para produção de carvão vegetal, uma vez que o rendimento em carbono fixo envolve, ao mesmo tempo, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal (ANDRADE, 1993).

### Densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal

A Figura 1 apresenta os valores médios da densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal, em g.cm<sup>-3</sup>.



Em que: G: *E. grandis*; P: *E. pellita*; S: *E. saligna*; U: *E. urophylla*; UG: *E. urograndis*; A: Clone Amarelo; B: Clone Branco. DB md: densidade básica da madeira; DRA cv: densidade relativa aparente do carvão vegetal. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste Tukey.

**Figura 1.** Valores médios da densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal.  
**Figure 1.** Mean values of basic wood density and apparent relative density of charcoal.

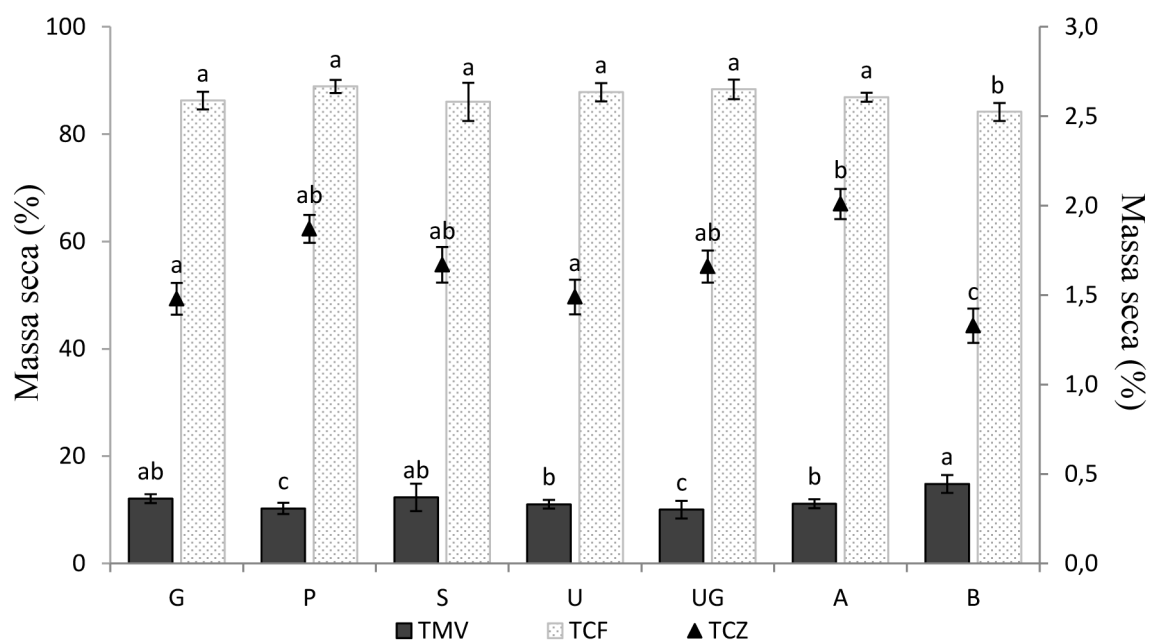
Observa-se que valores médios para densidade básica da madeira apresentam-se regulares visando ao uso para produção de energia. Brito et al. (1983) consideraram que, para a produção de carvão vegetal, a madeira deve apresentar uma densidade básica média próxima a 0,540 g.cm<sup>-3</sup>. Sendo assim, os valores observados indicam que as matérias-primas analisadas têm potencial para serem carbonizadas.

Protásio et al. (2014) encontraram valores médios de 0,458 e 0,462 g.cm<sup>-3</sup> para a densidade básica média da madeira de dois clones de eucalipto de 57 e 69 meses de idade, respectivamente, em consonância com os valores observados. A densidade é uma importante propriedade da madeira e deve ser considerada no seu uso como combustível, pois se relaciona diretamente com a produção de energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por unidade de volume (PROTÁSIO et al., 2014).

Brito e Barrichelo (1980) afirmaram que quanto maior a densidade da madeira, maior a densidade aparente do carvão vegetal e maior será a sua resistência mecânica. No presente estudo os aumentos nas densidades das madeiras não foram acompanhados, de uma forma repetitiva, de aumentos nas densidades relativas do carvão vegetal. Registrou-se que não houve diferença significativa entre os valores médios de densidade relativa aparente do carvão para dos sete materiais estudados.

### Análise química imediata

A Figura 2 ilustra os resultados das análises químicas imediatas dos carvões derivados dos materiais genéticos avaliados.



Em que: G: *E. grandis*; P: *E. pellita*; S: *E. saligna*; U: *E. urophylla*; UG: *E. urograndis*; A: Clone Amarelo; B: Clone Branco. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste Tukey.

**Figura 2.** Teores de carbono fixo (TCF), materiais voláteis (TMV) e cinza (TCZ) do carvão vegetal dos materiais genéticos estudados.

**Figure 2.** Fixed carbon contents (TCF), volatile materials (TMV) and ashes (TCZ) from the charcoal of the genetic materials under study.

Os materiais genéticos, excetuando-se o Clone Branco, formaram um grupo com os maiores valores médios para o teor de carbono fixo. O Clone Branco apresentou, além do menor valor médio de teor de carbono fixo, o menor teor de cinza. Deve-se considerar, para a utilização do carvão vegetal, nas suas variadas aplicações, os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinza, uma vez que os mesmos se relacionam com o poder calorífico, ritmo de queima e eficiência energética do carvão vegetal. Exemplo disso na Europa é que, para fins de cocção de alimentos (churrasco), o carvão vegetal deve apresentar no mínimo 75% de teor em carbono fixo e não ultrapassar 8% de cinzas em sua composição (AFNOR, 2005).

Os sete materiais avaliados apresentaram elevados teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis, concordando com os valores encontrados por Trugilho et al. (2005); Santiago e Andrade (2005); Oliveira et al. (2010); Neves et al. (2011), para diferentes espécies e clones de *Eucalyptus*. Os teores de cinza se mostraram altos em comparação com os valores médios observados na literatura, mas compatibilizando com os valores observados por Oliveira et al. (2010) para *E. pellita* de cinco anos de idade. Trugilho et al. (2005) afirmam que esta é uma característica que possui alta variabilidade e pode estar relacionada a diversos fatores.

Carneiro et al. (2014) afirmaram que durante a produção de carvão vegetal o carbono é convertido em carbono fixo, sendo esse o principal responsável pela energia estocada no carvão. Desta forma, quanto maior o teor de carbono fixo do carvão vegetal, maior será a sua eficiência energética.

## Poder calorífico

A Tabela 3 apresenta os valores médios dos poderes caloríficos da madeira e do carvão vegetal dos materiais genéticos avaliados.

**Tabela 3.** Poder calorífico da madeira e do carvão vegetal dos materiais genéticos estudados (kcal.kg<sup>-1</sup>).

**Table 3.** Calorific values of wood and charcoal of the genetic materials under study (kcal.kg<sup>-1</sup>).

Material Genético	PCS mad	PCI mad	PCS cv	PCI cv
<i>Eucalyptus grandis</i>	4109 bc	2286 a	7487 a	5051 a
Erro Padrão	±23,42	±16,97	±36,61	±39,49
<i>Eucalyptus pellita</i>	4208 ab	2288 a	7554 a	4244 c
Erro Padrão	±16,95	±12,11	±91,43	±93,90
<i>Eucalyptus saligna</i>	4227 a	2042 cd	7014 bc	4674 b
Erro Padrão	±16,97	±11,46	±48,93	±96,54
<i>Eucalyptus urophylla</i>	4082 c	2068 bc	7454 ab	5052 a
Erro Padrão	±15,48	±10,75	±51,84	±41,03
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	4117 c	2124 b	7252 abc	4877 b
Erro Padrão	±43,86	±30,67	±89,21	±29,43
Clone Amarelo – <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	4113 bc	2047 cd	7316 abc	4605 b
Erro Padrão	±17,59	±12,13	±68,51	±49,61
Clone Branco – <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	4057 c	1988 d	6917 c	4756 b
Erro Padrão	±23,48	±16,08	±35,01	±89,74

Em que: PCS md: poder calorífico superior da madeira; PCI md: poder calorífico inferior da madeira; PCS cv: poder calorífico superior do carvão; PCI cv: poder calorífico inferior do carvão vegetal. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância pelo teste Tukey.

Com base na Tabela 3, observa-se que as madeiras de *E. grandis* e *E. pellita* apresentaram os maiores poderes caloríficos inferiores que, na prática, são os esperados. Entre os clones não foram observadas diferenças estatísticas significativas. No caso dos poderes caloríficos inferiores dos carvões vegetais, destacaram-se com as maiores médias, *E. grandis* e *E. urophylla* e o *E. pellita* com a menor média dentre os materiais avaliados. Os demais apresentaram valores intermediários e estatisticamente iguais.

Todavia, para a madeira, o poder calorífico superior variou de 4.057 kcal.kg<sup>-1</sup> (Clone Branco) a 4.227 kcal.kg<sup>-1</sup> (*E. saligna*). Carneiro et al. (2014) avaliaram o poder calorífico superior da madeira de três clones de *Eucalyptus* aos sete anos de idade visando-se a produção de carvão vegetal e encontraram valores entre 4.542 e 4.663 kcal.kg<sup>-1</sup>. Levando-se em conta os diferentes sítios de implantação e os diferentes materiais genéticos em questão, estes valores são equiparáveis. A quantidade de calor contida na madeira e desprendida durante a sua combustão é um fator muito relevante no conhecimento da capacidade energética de determinada espécie.

## Análise das componentes principais (ACP)

Os autovetores das três primeiras componentes principais são mostrados na Tabela 4. Observa-se que essas três componentes principais explicam 85,31% da variância dos dados avaliados. A partir da terceira componente os valores não apresentam grandes alterações nos valores de suas variâncias. Considerou-se neste estudo as três componentes devido à grande porcentagem da variância total explicada por elas (os dados mais relevantes amostrados estão contidos nestas três primeiras componentes principais).

Considerando os valores da Tabela 4, em módulo, observa-se na componente principal 1, os maiores valores para teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis e poder calorífico superior do carvão vegetal, indicam que as relações entre essas variáveis podem influenciar na qualidade da madeira e do carvão para a seleção dos materiais avaliados.

Na componente principal dois, os maiores valores observados foram para rendimento em carvão vegetal e rendimento em carbono fixo. Analisando-se os sinais dos autovetores (Tabela 4) pode-se constatar que quanto maiores os escores para rendimento em carbono fixo e menores os escores para rendimento em carvão vegetal nessa componente, mais indicado será o material genético para uso energético. Porém, é preciso observar que a relação entre eles é negativa, ou seja, a medida que aumenta um fator descrese o outro. Observa-se ainda que os valores dos escores para os teores de



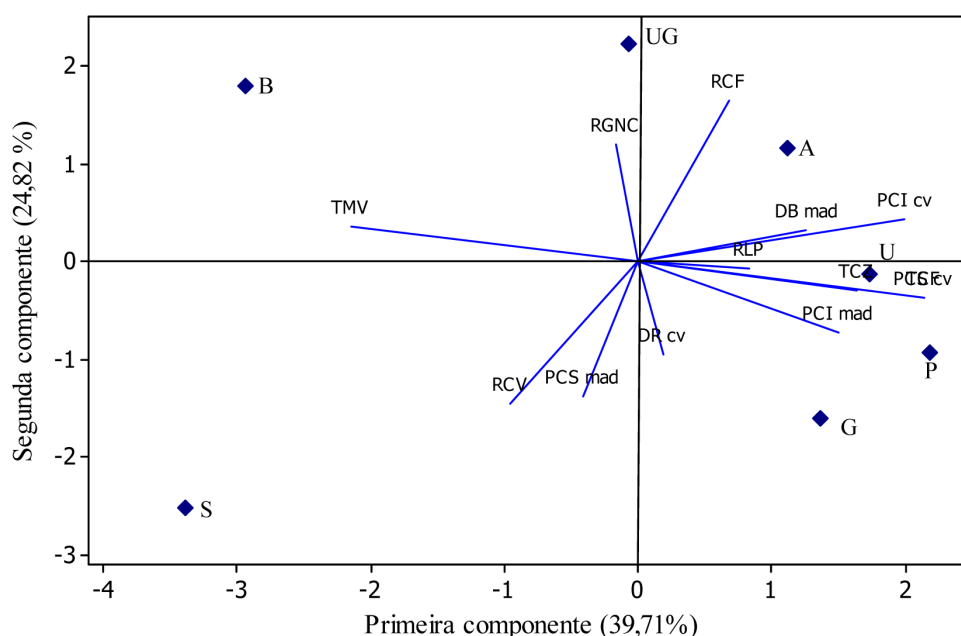
carbono fixo, materiais voláteis e de cinza foram baixos, e influenciaram também nos baixos valores para poder calorífico do carvão vegetal. No entanto, a componente principal três contém os menores valores para rendimento em carbono fixo, poder calorífico inferior da madeira e poder calorífico inferior do carvão vegetal, indicando possíveis influências nas demais características energéticas dos materiais estudados observada nessa componente.

**Tabela 4.** Autovetores das três primeiras componentes principais.

**Table 4.** Eigenvectors of the first three principal components.

Variável	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Densidade básica da madeira (DB mad)	0,245	0,101	-0,205
Densidade relativa aparente do carvão (DR cv)	0,037	-0,294	-0,495
Rendimento em líquido pirolenhoso (RLP)	0,162	-0,020	-0,544
Rendimento em carvão vegetal (RCV)	-0,184	-0,449	0,197
Rendimento em gases não condensáveis (RGNC)	-0,031	0,372	0,433
Rendimento em carbono fixo (RCF)	0,133	0,513	-0,024
Teor de materiais voláteis (TMV)	-0,415	0,115	-0,143
TCZ - Teor de cinza (TCZ)	0,317	-0,090	0,181
Teor de carbono fixo (TCF)	0,416	-0,114	0,119
Poder calorífico superior do carvão (PCS cv)	0,416	-0,114	0,118
Poder calorífico inferior do carvão (PCI cv)	0,387	0,136	0,045
Poder calorífico superior da madeira (PCS mad)	-0,079	-0,428	0,328
Poder calorífico inferior da madeira (PCI mad)	0,292	-0,225	0,008
Variância explicada (%)	39,71	24,82	20,78
Variância explicada acumulada (%)	39,71	64,53	85,31
Autovalores	5,16	3,22	2,69

Analisando a distribuição gráfica dos materiais genéticos estudados (Figura 4) em relação às duas primeiras componentes principais pode-se perceber a distinta separação entre os diferentes materiais genéticos, sendo mais nítida para *E. saligna* e Clone Branco. De maneira geral, dispõe-se o significativo efeito dos materiais genéticos de *Eucalyptus* sp avaliados.



Em que: Em que: G: *E. grandis*; P: *E. pellita*; S: *E. saligna*; U: *E. urophylla*; UG: *E. urograndis*; A: Clone Amarelo; B: Clone Branco; PCS md: poder calorífico superior da madeira; PCI md: poder calorífico inferior da madeira; PCS cv: poder calorífico superior do carvão; PCI cv: poder calorífico inferior do carvão madeira; RCV, RLP, RGNC e RCF: rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e carbono fixo; TCF, TMV e TCZ: teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinza; DB md: densidade básica da madeira; DR cv: densidade relativa aparente do carvão vegetal.

**Figura 3.** Diagrama de ordenação dos materiais genéticos considerando os escores e autovetores das componentes principais 1 e 2.

**Figure 3.** Diagram of the order of the genetic materials. considering the scores and eigenvectors of principal components 1 and 2.

Maiores valores de rendimento em carbono fixo e poder calorífico do carvão para Clone Amarelo, *E. urophylla* e *E. pellita* são observados, sendo estes os responsáveis pela maior proximidade entre eles. Nota-se, ainda, que o baixo teor de carbono fixo para o Clone Branco, assim como elevado valor de rendimento em carvão e baixo valor de densidade básica da madeira para *E. saligna* permitiram que estes dois materiais genéticos se encontrassem mais distantes dos demais.

## CONCLUSÕES

- a) Os resultados obtidos no contexto da presente pesquisa demonstram o elevado potencial para a utilização dos materiais genéticos de *Eucalyptus* sp para fins energéticos, sobretudo para a produção de carvão vegetal.
- b) O *E. saligna* apresentou o maior rendimento em carvão vegetal figurando ainda entre as maiores médias em carbono fixo e poder calorífico superior da madeira.
- c) Os materiais avaliados apresentaram valores médios regulares de densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal para uso energético.
- d) O Clone Branco apresentou o menor teor de carbono fixo e em rendimento em carbono fixo, elevado teor de materiais voláteis e baixos poderes caloríficos superiores da madeira e do carvão vegetal, não sendo dessa forma, indicado para fins energéticos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo fornecimento da bolsa de estudos ao primeiro autor e ao Laboratório de Pesquisas e Estudos em Reflorestamentos (LAPER) pelos trabalhos de transporte e seleção do material estudado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: carvão vegetal - análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília, 2013. 140 p.
- AFNOR - FRENCH ASSOCIATION FOR STANDARDIZATION. NF-EM 1860-2. Appliances, solid fuels and firelighters barbecue cooking. Saint Denis, 2005. 29 p.
- ANDRADE, A. M. Efeito da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto. 1993. 105 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.
- BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Relatório Anual de 2010. Disponível: [http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/RA02RelatorioFlorestal\\_2010.pdf](http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/RA02RelatorioFlorestal_2010.pdf). Acessado em 25 maio de 2014.
- BRASIL. Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia. 2013. Disponível em: < [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2013.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf) >. Acesso em: 08 jan. 2014.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: II. densidade da madeira x densidade do carvão. IPEF, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, 1980.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. IPEF, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, 1983.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CASTRO, A. F. N. M. Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal. 2011. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297 p.

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.

PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 15, jun./ago. 2008. Disponível em: <[http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao\\_materias.php?id=15](http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao_materias.php?id=15)>. Acesso em: 08 mar. 2014.

PAULA, R. P. Propriedades edáficas e desenvolvimento de eucalipto em topossequência na Flona Mário Xavier-RJ. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 344-351, 2012.

POYRY SILVICONCONSULT. **Estudo de Mercado: Consumo de Produtos de Base Florestal**. Curitiba: FIRJAN, 2012. 25 p. (Relatório Técnico).

PROTÁSIO, T. P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014.

SANTIAGO, A. R.; ANDRADE, A. M. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005.

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.

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.

WEC - WORLD ENERGY COUNCIL. **Survey of energy resources**. 2007. 29 p. Disponível em: <[http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WEC\\_Resources\\_summary-final\\_180314\\_TT.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WEC_Resources_summary-final_180314_TT.pdf)>. Acesso em: 25 fev. 2015.

Recebido em 26/08/2014

Aceito para publicação em 21/05/2015

