

ISSN 1980-041X

Outubro, 2007

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Florestas

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 35

Caracterização Individual de Árvores de *Eucalyptus benthamii* para Uso Energético

Edson Alves de Lima

Helton Damin da Silva

Washington Luiz Esteves Magalhães

Osmir José Lavoranti

Embrapa Florestas

Colombo, PR

2007

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, Km 111, CP 319
83411 000 - Colombo, PR - Brasil
Fone/Fax: (41) 3675 5600
www.cnpf.embrapa.br
sac@cnpf.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Luiz Roberto Graça
Secretária-Executiva: Elisabete Marques Oaida
Membros: Álvaro Figueredo dos Santos, Edilson Batista de
Oliveira, Honorino Roque Rodigheri, Ivar Wendling, Maria
Augusta Doetzer Rosot, Patrícia Póvoa de Mattos, Sandra Bos
Mikich, Sérgio Ahrens

Supervisão editorial: Luiz Roberto Graça
Revisão de texto: Mauro Marcelo Berté
Normalização bibliográfica: Elizabeth Câmara Trevisan
Foto da capa: Paulo Eduardo Telles
Editoração eletrônica: Mauro Marcelo Berté

1ª edição

1ª impressão (2007): sob demanda

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Florestas

Caracterização individual de árvores *de E. benthamii* para uso energético [recurso eletrônico] / Edson Alves de Lima ... [et al.]. Dados eletrônicos - Colombo : Embrapa Florestas, 2007.

1 CD-ROM. - (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Florestas, ISSN 1980-041X ; 35)

ISSN 1676-9449 (impresso)

1. Madeira – Produção energética. 2. Carvão vegetal. 3. *Eucalyptus benthamii*. 4. Cultura energética. I. Lima, Edson Alves de. II. Silva, Helton Damin da. III. Magalhães, Washington Luiz Esteves. IV. Lavoranti, Osmir José. V. Série.

CDD 662.65 (21. ed.)

© Embrapa 2007

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	7
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	12
Conclusões	23
Referências	23

Caracterização Individual de Árvores de *Eucalyptus benthamii* para Uso Energético

*Edson Alves de Lima*¹

*Helton Damin da Silva*²

*Washington Luiz Esteves Magalhães*³

*Osmir José Lavorant*⁴

Resumo

O *Eucalyptus benthamii* tem se mostrado uma espécie potencial para uso energético no Sul do Brasil, especialmente para regiões de ocorrência de geadas severas. O objetivo do trabalho foi caracterizar 91 indivíduos de *E. benthamii* com seis anos de idade, selecionados de três áreas comerciais no Município de Guarapuava, PR. Todas as avaliações foram realizadas a partir de discos coletados no DAP. Na madeira, foram avaliados a densidade básica, o volume, a massa, o poder calorífico, a densidade energética e o potencial energético; e no carvão foram avaliados o rendimento de carvão, o rendimento de licor pirolenhoso, o rendimento de gases, o poder calorífico do carvão, o teor de carbono fixo, o teor de matérias voláteis, o teor de cinzas e o potencial energético do carvão. Para o tratamento estatístico, utilizou-se a análise multivariada. A produtividade energética do *E. benthamii* foi superior às produtividades energéticas de outros biocombustíveis encontrados na literatura. Foram observadas variações entre indivíduos, sendo que as variáveis mais importantes na avaliação do *E. benthamii* para energia foram: massa, volume, potencial energético da madeira e potencial energético do carvão.

Palavras-chave: Tolerância à geada, produtividade energética.

¹Licenciado em Ciências Agrícolas, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas. edson@cnpf.embrapa.br

²Engenheiro Florestal, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas. helton@cnpf.embrapa.br

³Engenheiro Químico, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas. wmagalha@cnpf.embrapa.br

⁴Estatístico, Doutor, Técnico de Nível Superior da Embrapa Florestas, osmir@cnpf.embrapa.br

Individual *Eucalyptus benthamii* trees characterization for energy usage

Edson Alves de Lima

Helton Damin da Silva

Washington Luiz Esteves Magalhães

Osmir José Lavoranti

Abstract

The *Eucalyptus benthamii* species has shown potential for energy usage in Southern Brazil, specially on regions with intense frost occurrence. The objective of this research was to characterize 91 individuals of *E. benthamii* with 6 years of age, selected from 3 commercial plantations at Guarapuava municipality, State of Paraná. All evaluations were performed from discs collected at DBH. Evaluations were done on basic density, volume, biomass, calorific power, energetic density and energetic potential; from the charcoal, evaluations were done on yields, pyrolytic liquor yields, gas yields, charcoal calorific power, fixed carbon content, volatile material content, ashes content and energetic potential of charcoal. For the statistic treatment a multivariate analysis was employed. The energy productivity of *E. benthamii* surpassed the ones from available biofuels found in the literature. It was observed variations among individuals and within the evaluation of *E. benthamii* for energy the most important variables were: biomass, volume, wood energetic potential and charcoal energetic potential.

Keywords: Frost tolerance, energy productivity.

Introdução

Historicamente a biomassa florestal é tida como uma importante fonte de energia (MALIK et al., 2001; COUTO et al., 2002). No Brasil, a biomassa participa com 30,1 % da matriz energética, sendo 12,4 % a partir da lenha e do carvão (BRASIL, 2006). Dos 321 milhões de metros cúbicos de madeira consumidos, 69 % são destinados para geração de energia (BRITO, 2007), sendo que a demanda está assim distribuída: carvão para siderúrgicas 39 %; setor residencial 32 %; no setor industrial, nos ramos de cimento, químico, alimentos, bebidas, cerâmicas, papel e celulose 21 %; e no setor agrícola 6 % (BRITO e CINTRA, 2004). Segundo Brito (2007), considerando o consumo médio anual de dois metros cúbicos de madeira per capita, estima-se que pelo menos 30 milhões de pessoas dependem da madeira como fonte de energia domiciliar no Brasil, sobretudo pessoas das classes mais pobres da população.

O setor que mais demanda madeira para energia (siderúrgico) apresentou estagnação no consumo de carvão vegetal no período de 1997 a 2006 (ABRAF, 2007). Dos 5,5 milhões de toneladas consumidos em 2005, somente 2,5 milhões de toneladas (46 %) tiveram origem em florestas plantadas, sendo o restante de florestas nativas (SBS, 2006). A produção brasileira de ferro-gusa em 2005 foi de 33,88 milhões de toneladas, das quais 33,7 % a partir de carvão vegetal e 67,3 % a partir de coque mineral, demonstrando que existe um mercado potencial para o crescimento na produção de carvão vegetal (SBS, 2006).

No Brasil, várias espécies de eucalipto foram testadas para atender a produção de lenha, no entanto, a introdução inicial obedeceu apenas o zoneamento ecológico proposto por Golfari e Pinheiro Neto em 1970 (TRUGILHO, 2001). A seleção com base nas características da madeira só foi considerada mais tarde, especialmente para atender a produção de carvão vegetal e de celulose e papel. Posteriormente, vários trabalhos foram realizados para obter mais informações sobre a influência da qualidade da madeira e do processo de obtenção do carvão vegetal (TRUGILHO et al., 2001).

Um problema relacionado à utilização do carvão vegetal é a falta de padrão, ou seja, a alta variabilidade em qualidade, considerando que esse produto sofre grande influência da madeira que lhe deu origem e do sistema de produção. Esta variabilidade ocasiona desperdício de material, especialmente no uso siderúrgico, pois dificulta a operação dos alto-fornos, principal destino do carvão vegetal.

Com a necessidade de auto-suficiência, as empresas siderúrgicas estão dando maior importância ao desenvolvimento de novas tecnologias de produção de madeira, avaliação da sua qualidade, bem como sua transformação em carvão vegetal. As avaliações que levam em consideração o potencial produtor do carvão e a sua qualidade têm se tornado uma rotina para as empresas que necessitam dessa matéria-prima (INEE, 2006).

Devido a grande plasticidade de adaptação e rápido crescimento, o gênero *Eucalyptus* se consolidou como principal fornecedor de matéria prima para a indústria, inclusive na produção de carvão vegetal (REMADE, 2001). No entanto, para os estados do Sul do Brasil, onde as temperaturas baixas e a ocorrência de geadas têm sido os principais fatores limitantes da sobrevivência e do crescimento dos eucaliptos, podemos destacar algumas poucas espécies que têm demonstrado tolerância. Dentre aquelas já plantadas, podemos citar *E. dunni*, *E. viminalis* e recentemente *E. benthamii* Maiden et Cambage, que vem se destacando em função da tolerância à geada, crescimento, forma e capacidade de rebrota. Apesar do potencial de produção de biomassa, até o momento poucos estudos demonstraram o real potencial do *E. benthamii* para fins energéticos. Por isso, torna-se necessário caracterizar a qualidade energética desta espécie tanto da madeira quanto do carvão.

O objetivo deste trabalho foi verificar a variabilidade das características dendrométricas e energéticas em árvores de *E. benthamii*.

Material e Métodos

Para este trabalho foram coletados discos do DAP de 91 árvores de *E. benthamii*, provenientes de três áreas de plantio comercial no Município de Guarapuava, PR. Guarapuava localiza-se no centro-oeste, terceiro planalto chamado Planalto de Guarapuava, com coordenadas geográficas 25° 23' 26'' S e 51° 27' 15'' E, e 1.120 m de altitude. A cobertura vegetal original da região compõe-se de campos limpos com estepes de gramíneas baixas e capões de mata de Araucária. O clima é do tipo Cfb, subtropical úmido, com verões frescos, geadas freqüentes e sem estação seca, com temperatura variando de 6,8 °C a 36 °C, com média de 16,8 °C e precipitação média anual de 1.938 mm (SALVADOR et al., 2005).

As áreas de coleta do material foram implantadas no ano de 2001 com mudas de sementes produzidas na APS da *Embrapa Florestas*. A APS da *Embrapa Florestas* foi implantada em 1988 com sementes de uma base genética de sete árvores de polinização livre, e têm como procedência geográfica Wentworth Falls – NSW, Austrália, com latitude de 33°48' S, longitude de 150°24' E. A altitude é de 150 m e a precipitação pluviométrica anual varia de 890 mm a 2.000 mm.

Para este trabalho foram utilizados 91 indivíduos de *E. benthamii* com seis anos de idade, selecionados em três áreas de plantio. As áreas de plantio estão localizadas no Município de Guarapuava, PR e a Tabela 1 apresenta alguns dados destas áreas.

Tabela 1. Localização, idade, espaçamento, área total, número de árvores selecionadas e grau de seleção de indivíduos para avaliação do potencial energético de três áreas, no Município de Guarapuava, PR.

Área	Localização	Idade	Espaçamento	Área do plantio	NAS*	Intensidade de seleção
PFANN	Guarapuava – PR	6 anos	3 m x 2 m	8 ha	36	370:1
Agrária	Guarapuava – PR	6 anos	3 m x 2 m	29 ha	35	1381:1
Roncador	Guarapuava – PR	6 anos	3 m x 2 m	6,3 ha	20	525:1

* NAS = número de árvores selecionadas.

Os 91 indivíduos foram selecionados com base em características dendrométricas e silviculturais. As características avaliadas no campo foram: ausência de bifurcações ou defeitos no tronco, crescimento em diâmetro superior à média da população, ausência de sintomas ou efeito de geadas e sem ataques de pragas e doenças. A caracterização dendrométrica das árvores constou de medidas de diâmetro à altura de 0,1 m, 0,3 m, 0,7 m, 1,3 m e 3,3 m, 5,3 m, (segundo com medidas de dois em dois metros, até a altura comercial – $\varnothing \geq 5$ cm). Com base nas informações de altura e diâmetro, foi calculado o volume total de cada árvore. Para isso, foi utilizado equação de Smalian, somando-se os volumes individuais de cada seção avaliada (CAMPOS e LEITE, 2006):

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n, \text{ ou onde:}$$

$$V = \{[\pi/40000((D_1^2 + D_2^2)/2) \times L_1] + \dots + [\pi/40000((D_{n-1}^2 + D_n^2)/2) \times L_{n-1}]\}, \text{ em que:}$$

D_1 = maior diâmetro da seção 1;

D_2 = menor diâmetro da seção 1;

L_1 = comprimento da seção 1.

n = última seção comercial.

A participação da casca no volume final foi estimada em 10 %. Em seguida foram coletados os discos no DAP e encaminhados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da *Embrapa Florestas* para as avaliações energéticas. As características da madeira avaliadas foram: densidade básica (g cm^{-3}) segundo a norma NBR 11941/2003, o poder calorífico (kcal kg^{-1}) segundo a norma NBR 8633/1984 e em seguida calculados a densidade energética (kcal m^{-3}) e o potencial energético de cada indivíduo ($\text{kcal indivíduo}^{-1}$), em função da massa produzida.

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico (mufla) adaptado. O

controle de temperatura foi automático para incrementos de $5,3 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ até $180 \text{ }^\circ\text{C}$, passando para $1 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ até $500 \text{ }^\circ\text{C}$, permanecendo por duas horas. O tempo total de carbonização foi de oito horas. O material foi seco em estufa a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na avaliação da qualidade do carvão, foi realizada a análise imediata (teor de carbono fixo, matérias voláteis, matérias condensáveis e cinzas), segundo a norma NBR 8112/1986, e o poder calorífico pela norma NBR 11941/2003. Com base no rendimento do carvão, na massa e no poder calorífico do carvão, foi estimado o potencial energético do carvão ($\text{kcal indivíduo}^{-1}$).

Análise estatística

A partir das características mensuradas, no campo e laboratório para cada indivíduo, procederam-se as análises multivariadas dos componentes principais e de fator com o objetivo de reduzir o número de variáveis e identificar aquelas que apresentam maior contribuição para a variância total (DUARTE, 1997; MANLY, 1986). O *software* utilizado para aplicação das análises multivariadas foi o programa SAS (*Sistem Analysis Statstic*).

As correlações entre as características dendrométricas e de qualidade energética da madeira foram estimadas pelo coeficiente de Pearson (r).

Pelo critério de KAISER, retiveram para análise de fatores os componentes principais com autovalores superiores a 1 (um) desde que as variâncias acumuladas explicassem mais de 70 % da variação total. Esses componentes foram submetidos à análise de fator. Numa análise fatorial, as variáveis que apresentaram comunalidades inferiores a 0,7 foram eliminadas e as restantes submetidas à nova análise até que todos atendessem esse critério.

Em seguida, foi realizada a rotação dos eixos para a melhor interpretação dos fatores, conforme descrito por Meyer e Braga (1998) e Souza e Khan (2001). A rotação foi realizada pelo método Varimax, que faz uma rotação ortogonal dos eixos. Essa rotação não afeta as comunalidades das variáveis

e nem a proporção explicada da variância total.

Para o cálculo do fator de cada indivíduo, foi considerada a comunalidade e o valor observado de cada variável, dado pela seguinte expressão:

$$F_i = \sum(CM_{ij} \cdot Vo_j), \text{ onde;}$$

F_i : fator do indivíduo i ;

CM_{ij} : comunalidade da variável j do indivíduo i ;

Vo_j : valor observado para a variável j no indivíduo i .

Através dos fatores de cada indivíduo, foi estabelecida uma classificação em ordem decrescente.

Resultados e Discussão

Variabilidade das características de interesse energético

As médias e as faixas de variabilidade das características dos indivíduos estão apresentadas na Tabela 2. Nota-se que a variabilidade depende da característica analisada, sendo que para algumas tiveram maiores variações enquanto que para outras, as variações foram menores.

Tabela 2. Faixas de variabilidade das características de três plantios comerciais de *E. benthamii* de seis anos na região de Guarapuava, PR.

Avaliação da madeira				
Característica¹	Média	Limite inferior	Limite superior	Δ (%)²
Densidade básica (g cm ⁻³)	0,475 ± 0,039*	0,436	0,514	17,9
Volume (m ³ indivíduo ⁻¹)	0,527 ± 0,125	0,402	0,652	62,2
Massa (kg indivíduo ⁻¹)	249,8 ± 61,2	188,6	311	64,9
Poder calorífico (kcal kg ⁻¹)	4681 ± 487,6	4193,4	5168,6	23,3
Dens. energética (kcal m ⁻³)	2222 ± 277,4	1944,6	2499,4	28,5
Potencial energético (kcal indivíduo ⁻¹)	1164466 ± 300116,3	864349,7	1464582	69,4
Avaliação do carvão				
Característica¹	Média	Limite inferior	Limite superior	Δ (%)
Rendimento do carvão (%)	34,86 ± 1,7	33,16	36,56	10,3
Rend. licor pirolenhoso (%)	39,64 ± 2,7	36,94	42,34	14,6
Rendimento de gases (%)	25,56 ± 2,6	22,96	28,16	22,6
Teor de carbono fixo (%)	81,85 ± 3,5	78,35	85,35	8,9
Teor de mat. voláteis (%)	17,17 ± 3,6	13,57	20,77	53,1
Teor de cinzas (%)	0,96 ± 0,3	0,66	1,26	90,9
Poder cal. (kcal kg ⁻¹)	8777 ± 520	8257	9297	12,6
Potencial energético (kcal indivíduo ⁻¹)	765177 ± 198342,1	566834,9	963519,1	70,0

¹Média de 91 árvores. ²Variação do limite superior em relação ao limite inferior. *p ≤ 0,05.

A densidade básica, os rendimentos de carvão e licor pirolenhoso, teor de carbono fixo e o poder calorífico do carvão apresentaram variabilidades menores, sendo inferiores a 20 %, na comparação entre o limite superior e

o limite inferior do intervalo de confiança da média (Tabela 2). O poder calorífico da madeira, a densidade energética da madeira e o rendimento de gases apresentaram variabilidade intermediária. Observa-se que as características que apresentaram maiores variações foram o volume (62,2 %), a massa (64,9 %), o potencial energético da madeira (69,4 %) e o potencial energético do carvão (70 %).

A densidade básica média observada ($0,475 \text{ g cm}^{-3}$) foi maior que a densidade básica do *E. grandis* ($0,391 \text{ g cm}^{-3}$) e similar ao *E. saligna* ($0,476 \text{ g cm}^{-3}$) implantados em Salesópolis, SP, avaliados aos 10 anos de idade (Brito et al., 1983). Thomaz (2007) caracterizou árvores de *E. benthamii* com 18 anos de idade. A densidade observada pelo autor foi de $0,529 \text{ g cm}^{-3}$.

Observa-se na Tabela 2 que o volume médio por árvore foi de $0,527 \text{ m}^3$, com variação de $0,402$ a $0,652 \text{ m}^3 \text{ indivíduo}^{-1}$. Considerando o espaçamento dos plantios, a produtividade média estimada do *E. benthamii*, aos seis anos foi de $878 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, superior ao *E. saligna* ($852 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e inferior ao *E. grandis* ($1.105 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), ambos aos 10 anos de idade (BRITO et al., 1983). Quanto à produtividade média, foi de 416 Mg ha^{-1} aos seis anos, sendo superior ao *E. saligna* ($405,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) e inferior ao *E. grandis* ($518,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) aos 10 anos (BRITO et al., 1983).

O poder calorífico da madeira foi de $4.681 \text{ kcal kg}^{-1}$, ligeiramente inferior ao observado por Thomaz (2007), que quantificou em $4.887 \text{ kcal kg}^{-1}$ o poder calorífico de *E. benthamii* com 18 anos. O poder calorífico observado neste trabalho ficou em posição intermediária de 16 espécies do gênero *Eucalyptus*, conforme revisão realizada por Quirino et al. (2005). Nesta revisão, o maior poder calorífico das espécies de eucalipto foi do *E. pellita* ($5.023 \text{ kcal kg}^{-1}$) e o menor foi do *E. urophilla* ($4.422 \text{ kcal kg}^{-1}$).

A densidade energética considera a energia contida num determinado volume de madeira. Neste trabalho, a densidade energética média da madeira foi de $2.222 \text{ kcal m}^{-3}$. Este resultado é superior ao encontrado por Brito et al., (1983) para o *E. grandis* ($2.080 \text{ kcal m}^{-3}$), equivalente ao *E.*

globulus (2.240 kcal m⁻³) e inferior ao *E. citriodora* (3.440 kcal m⁻³).

A produtividade energética por unidade de área dá uma melhor visualização do potencial energética da cultura. A média de produtividade energética estimada do *E. benthamii* (considerando população de 1.666 plantas ha⁻¹) foi de 1,94 Tcal ha⁻¹ aos seis anos. Brito et al. (1983) estimou o potencial energético de oito espécies de eucalipto. A produtividade energética variou de 0,3 Tcal ha⁻¹ para o *E. gummifera* até 2,5 Tcal ha⁻¹ para o *E. pilularis*. Lima (2000) avaliou a produtividade e equivalência energética de *Eucalyptus* sp. em relação ao óleo combustível e à energia elétrica. O autor estimou produtividades energéticas de 0,45 Tcal ha⁻¹ e 0,9 Tcal ha⁻¹ para o *E. grandis* e *E. paniculata*, respectivamente. A produtividade energética média anual estimada do *E. benthamii* (323 Gcal ha⁻¹) foi superior ao observado por Urquiaga et al. (2004) para o etanol (38 Gcal ha⁻¹) e para o biodiesel a partir do dendê (37 Gcal ha⁻¹). Em comparação a tep (toneladas equivalente de petróleo), unidade energética padrão (COPEL, 2007), a produtividade energética média do *E. benthamii* foi de 150,8 tep em seis anos, resultando em 25,1 tep anuais.

O rendimento médio do carvão foi de 34,86 %, ligeiramente superior ao encontrado por Thomaz (2007) que foi de 34,02 % para *E. benthamii* aos 18 anos e similar ao rendimento verificado por Pereira et al. (1997) para a mesma espécie, aos sete anos (34,2 %). Comparado às outras espécies, foi superior ao *E. grandis* (33,3 %) e ao *E. saligna*, no entanto, foi inferior ao *E. triantha* (37,8 %) e ao *E. microcorys* (35,9 %) (Brito et al., 1983). Trugilho et al. (2005), trabalhando com seis clones de híbridos de eucalipto, observaram rendimentos que variaram de 35,95 % a 40,24 %. No entanto, a temperatura final de carbonização foi de 450 °C, permanecendo por 30 minutos nesta temperatura. A temperatura menor, aliada ao menor tempo de residência, pode explicar o maior rendimento.

O poder calorífico médio do carvão foi de 8.777 kcal kg⁻¹ (Tabela 2). Este valor está acima do observado por Thomaz (2007) para *E. benthamii* aos 18 anos (6.569 kcal kg⁻¹). O poder calorífico médio do carvão observado neste trabalho foi superior ao poder calorífico (8.255 kcal kg⁻¹) encontrado

por Vella et al. (1989) para o *E. tereticornis* com nove anos de idade em Viçosa, MG.

O Estado de São Paulo apresenta padrões mínimos de qualidade, física, química e de produção de carvão vegetal como base para certificação de produtos, estabelecidos pela norma PMQ 0-03 (SÃO PAULO, 2003). Esta norma estabelece que, quanto à qualidade química, o carvão vegetal deve apresentar teor de carbono fixo mínimo de 75 % e teor de cinzas abaixo de 1,5 %. Nota-se que os valores médios de carbono fixo (81,85 %) e cinzas (0,96 %) revelados pela análise imediata no *E. benthamii* estão de acordo com esta norma.

Correlações entre as variáveis

Na Tabela 3 estão apresentadas as correlações entre as variáveis estudadas. Considera-se que duas variáveis possuem associação entre si quando o coeficiente de correlação for significativo a 5 % de probabilidade. No entanto, somente as correlações significativas e consideradas altas (maiores que 0,8) serão discutidas neste trabalho.

A massa da madeira apresentou correlação positiva com o volume (0,93). Este resultado pode ser considerado normal, pois na estimativa da massa é considerado o volume e a densidade básica, sendo, portanto, diretamente proporcional. O volume também apresentou correlação positiva com o potencial energético da madeira (0,87) e potencial energético do carvão (0,90). Estas correlações também são bastante lógicas, pois quanto maior o volume, maiores serão os potenciais energéticos da madeira e do carvão.

Tabela 3. Coeficientes de correlação linear entre as características dendrométricas e energéticas de 91 indivíduos de *E. benthamii* aos seis anos, no Município de Guarapuava, PR.

Variável	PEC	PCC	TCZ	TMV	TCF	RG	RL	RC	PEM	DEM	PCM	MA	VOL
DBM	0,29**	0,22*	-0,16	0,07	-0,06	-0,06	0,07	-0,01	0,19	0,56**	-0,11	0,25*	-0,09
VOL	0,90**	-0,07	-0,12	0,08	-0,06	-0,25*	0,14	0,18	0,87**	-0,18	-0,14	0,93**	
MA	0,97**	0,01	-0,16	0,11	-0,09	-0,27*	0,15	0,19	0,92**	0,02	-0,17		
PCM	-0,18	-0,04	0,07	-0,09	0,09	0,01	0,05	-0,09	0,23*	0,76**			
DEM	0,03	0,10	-0,04	-0,03	0,04	-0,03	0,09	-0,09	0,31**				
PEM	0,89**	-0,01	-0,13	0,08	-0,07	-0,27*	0,16	0,16					
RC	0,27**	-0,44**	-0,01	0,68**	-0,69**	-0,33**	-0,32**						
RL	0,14	0,29**	0,01	-0,25*	0,26*	-0,79**							
RG	-0,31**	0,00	-0,00	-0,19	0,20								
TCF	-0,11	0,46**	0,11	-1,00									
TMV	0,12	-0,45**	-0,19										
TCZ	-0,16	-0,05											
PCC	0,15												

*, ** Significativo a 5 % e 1 %, respectivamente. PEC = potencial energético do carvão; MA = massa da madeira; PEM = potencial energético da madeira; VOL = volume da madeira; TCF = teor de carbono fixo; RC = rendimento do carvão; TMV = teor de matérias voláteis; DEM = densidade energética da madeira; PCM = poder calorífico da madeira; RG = rendimento de gases; RLP = rendimento de licor pirolenhoso; DBM = densidade básica da madeira.

Da mesma forma, a massa apresentou correlações positivas com os potenciais energéticos da madeira (0,92) e do carvão (0,97).

Análise dos componentes principais

Os componentes principais apresentaram autovalores que variaram de 0 a 4,1. Nota-se que somente os cinco primeiros componentes apresentaram autovalores maiores que 1 e explicaram 95,88 % da variação total (Tabela 4).

Tabela 4. Autovalores dos componentes principais (em negrito) extraídos da matriz de correlação das características de *E. benthamii*.

Componentes principais	Autovalor	Varição total (%)	Varição acumulada (%)
1	4,11408	34,28	34,28
2	2,68139	22,34	56,63
3	1,97718	16,48	73,11
4	1,58548	13,21	86,32
5	1,14786	9,57	95,88
6	0,45325	3,78	99,66
7	0,02801	0,23	99,89
8	0,00576	0,05	99,94
9	0,00341	0,03	99,97
10	0,00188	0,02	99,99
11	0,00157	0,01	100,00
12	0,00012	0,00	100,00

Os primeiros cinco componentes principais foram submetidos à análise de fator. Numa primeira análise, foram eliminadas as variáveis que apresentaram comunalidade menor que 0,7 (poder calorífico do carvão e teor de cinzas) e as demais foram mantidas. A análise dos fatores rotacionados (Tabela 5), por meio do método Varimax, permitiu verificar a

importância de cada variável dentro de cada fator. As variáveis consideradas importantes foram as que apresentaram coeficiente de correlação igual ou maior de 0,7 e estão destacadas em negrito.

Tabela 5. Fatores rotacionados obtidos através da matriz de correlação das variáveis pelo método Varimax.

Variáveis*	CM**	Fatores***				
		Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
PEC	0,97570654	0,95308	0,15006	-0,10540	0,15040	0,1048
MA	0,99486461	0,95105	0,18757	-0,13207	0,18242	0,0668
PEM	0,99317938	0,89993	0,28056	0,16055	0,20802	-0,1885
VOL	0,99001033	0,89197	0,16215	-0,31095	0,15114	-0,2204
TCF	0,93137164	-0,31120	0,87392	-0,24519	0,10297	0,0086
RC	0,75459232	0,40939	-0,74324	0,12916	-0,07884	-0,1081
TMV	0,92488277	0,32356	-0,86633	0,24595	-0,09571	0,0029
DEM	0,99853042	0,05874	0,30922	0,93847	0,12978	0,0435
PCM	0,99868772	-0,10107	0,26906	0,74774	0,08193	-0,5918
RG	0,97471012	-0,46638	-0,02902	-0,11144	0,86199	0,0301
RLP	0,97239747	0,20309	0,51806	0,03042	-0,81250	0,0410
DBM	0,99705910	0,23275	0,12159	0,48536	0,10367	0,8257

*PEC = potencial energético do carvão; MA = massa da madeira; PEM = potencial energético da madeira; VOL = volume da madeira; TCF = teor de carbono fixo; RC = rendimento do carvão; TMV = teor de matérias voláteis; DEM = densidade energética da madeira; PCM = poder calorífico da madeira; RG = rendimento de gases; RLP = rendimento de licor pirolenhoso; DBM = densidade básica da madeira. **CM = comunalidade. ***Fator 1 = volume, massa, potencial energético da madeira e potencial energético do carvão; Fator 2 = contrastes de teor de matérias voláteis vs teor de carbono fixo e rendimento de carvão vs teor de carbono fixo; Fator 3 = poder calorífico da madeira e densidade energética da madeira; Fator 4 = contraste do rendimento de licor pirolenhoso vs rendimento de gases; Fator 5 = densidade.

O fator 1 explicou 34,28 % da variação total e está associado às variáveis volume, massa, potencial energético da madeira e potencial energético do carvão. No entanto, os potenciais energéticos da madeira e do carvão estão intimamente ligados ao potencial de crescimento de cada indivíduo (volume e massa). Este fator pode ser considerado como fator energético. O potencial energético da madeira depende da massa e do poder calorífico da madeira. Nota-se na Tabela 2 que a maior variação ocorreu na massa (64,9 %), comparada ao poder calorífico (23,3 %). Possivelmente, a massa tenha papel mais importante na determinação do potencial energético da

madeira comparada ao poder calorífico. Já o potencial energético do carvão depende da massa da madeira, do rendimento do carvão e do poder calorífico do carvão. Destas três variáveis, a que apresentou maior variação foi a massa (64,9 %) comparada ao rendimento do carvão (10,3 %) e poder calorífico do carvão (11,6 %).

O fator 2, responsável por 22,34% da variação total, está associado a dois contrastes, sendo eles: teor de carbono fixo x rendimento de carvão e teor de carbono fixo x teor de matérias voláteis do carvão. Este fator está associado às variáveis do carvão. Isto permite chamar este fator de “fator de carbonização”. O teor de carbono fixo indica o “grau de pureza” do carvão, sendo inversamente proporcional ao seu rendimento. O teor de matérias voláteis é complementar ao teor de carbono fixo e de cinzas contidos no carvão e revelados pela análise imediata, por isso, o contraste entre estas duas variáveis já era esperado.

O fator 3 explicou 16,48 % da variação total, e está relacionado ao poder calorífico da madeira e a densidade energética da madeira. Estas constatações permitem chamar de fator “relacionado à madeira”. A densidade energética da madeira é o produto do volume pelo poder calorífico da madeira, estando, portanto, correlacionados positivamente como pode ser observado na Tabela 3.

O fator 4, responsável por 13,81 % da variação total, está relacionado ao contraste entre rendimento de licor pirolenhoso x rendimento de gases.

Observou-se que o quinto fator explica 9,57 % e está ligado à variável densidade básica da madeira, sendo considerado fator de “densidade”.

Classificação dos indivíduos

Os fatores e os índices calculados de cada indivíduo estão apresentados na Tabela 6. Com relação aos fatores, destacam-se o indivíduo 33 com fator 3.697.562 e o indivíduo 22 de fator 2.978.633 que, comparados à média geral, foram superiores em 102 % e 63 %, respectivamente. No entanto, 49 indivíduos foram superiores à média geral (1.826.929). Verifica-se

também na Tabela 6 que, a partir do terceiro classificado (indivíduo 27), as diferenças entre indivíduos estão bastante estreitas, não permitindo, assim, o descarte de indivíduos dos estudos futuros.

Além disso, ainda não se sabe qual o comportamento desses indivíduos em relação à capacidade e vigor da rebrota e a capacidade de enraizamento. Por isso, sugere-se que sejam feitas avaliações de campo para avaliação da rebrota. Nestas avaliações de campo, sugere-se avaliar número, diâmetro e altura dos brotos, que poderão dar um indicativo do vigor da brotação, característica importante para o sistema de talhadia. Em seguida, pode-se trabalhar com os 25 melhores classificados para avaliar o potencial de

Tabela 6. Índices dos indivíduos de *E. benthamii* de acordo com o fator 1 (massa, volume, potencial energético da madeira e potencial energético do carvão).

Indivíduo	Fator	Classificação	Indivíduo	Fator	Classificação	Indivíduo	Fator	Classificação
33	3.697.562	1	41	2.026.955	32	90	1.581.908	63
22	2.978.633	2	36	2.022.628	33	25	1.529.167	64
27	2.538.389	3	23	2.017.706	34	8	1.516.344	65
48	2.493.932	4	68	2.008.887	35	62	1.485.233	66
34	2.413.614	5	19	2.000.938	36	21	1.465.388	67
38	2.370.712	6	64	1.993.978	37	6	1.443.477	68
66	2.368.019	7	73	1.978.067	38	40	1.437.865	69
67	2.362.380	8	37	1.975.006	39	65	1.432.311	70
43	2.318.024	9	26	1.962.160	40	77	1.421.618	71
49	2.311.228	10	61	1.955.880	41	2	1.414.261	72
35	2.303.373	11	12	1.954.251	42	82	1.413.144	73
42	2.280.116	12	57	1.953.625	43	13	1.408.535	74
14	2.267.340	13	55	1.944.849	44	87	1.356.402	75
60	2.230.085	14	63	1.916.339	45	86	1.355.657	76
52	2.222.679	15	10	1.909.405	46	53	1.355.044	77
70	2.214.494	16	17	1.901.025	47	83	1.330.249	78
28	2.204.620	17	71	1.876.643	48	9	1.306.817	79
51	2.202.163	18	1	1.851.595	49	89	1.299.743	80
16	2.181.966	19	44	1.824.769	50	91	1.283.658	81
47	2.175.087	20	39	1.729.224	51	81	1.231.956	82
56	2.166.711	21	46	1.715.531	52	76	1.213.176	83
30	2.152.360	22	7	1.714.633	53	84	1.193.449	84
31	2.129.416	23	20	1.681.683	54	80	1.161.762	85
18	2.123.404	24	5	1.681.557	55	88	1.159.707	86
29	2.116.245	25	58	1.657.168	56	85	1.156.539	87
69	2.105.858	26	3	1.654.149	57	74	1.074.688	88
59	2.091.402	27	15	1.650.086	58	72	1.033.978	89
50	2.080.958	28	45	1.635.645	59	79	988.504	90
24	2.057.764	29	54	1.610.488	60	75	964.019	91
4	2.056.371	30	11	1.600.783	61	Média geral		
32	2.029.672	31	78	1.585.720	62		1.826.929	

enraizamento.

Conclusões

1. Existem diferenças entre indivíduos quanto à produtividade energética. Na seleção de indivíduos de *E. benthamii* para produção de energia, deve-se dar maior importância para as variáveis: massa, volume, potencial energético da madeira e potencial energético do carvão.
2. Os indivíduos 22 e 33 apresentaram potencial superior e deverão ser melhor estudados, com atenção no que se refere à possibilidade de inclusão em testes de propagação vegetativa.
3. A produtividade energética média anual estimada do *E. benthamii* foi superior a outros biocombustíveis encontrados na literatura, como o etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel de dendê, soja e girassol.
4. A produtividade energética do *E. benthamii* observada neste trabalho foi superior ao *E. grandis* e ao *E. paniculata*, citados na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradem à empresa Golden Tree Reflorestadora, pela valiosa colaboração durante a avaliação de campo, coleta e fornecimento dos discos utilizados no trabalho.

Referências

- ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2006. Brasília, 80p. 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986, 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2006: Ano base 2005**. Resultados Preliminares / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2006, 28p. Disponível em: <http://www.ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2007.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2007.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, n.14, p. 9-20, 1977.

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. Piracicaba – SP, **IPEF**, 1983, n. 23, p.53-56.

BRITO, J.O.; CINTRA, T.C. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão estratégica e demanda de ações. Viçosa – MG, **Biomassa & Energia**, v.1, n.2, p.157-163, 2004.

BRITO, J.O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, SBS, n. 21 v. 59, 2007. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/destaques_ousoenergeticodamadeira.pdf?PHPSESSID=957138c9e4a697a2dd8d56c6499c1ec6>. Acesso em: 10 jul. 2007.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal**. Editora UFV, Viçosa, MG, 2 ed., 2006, 470p.

COPEL. **Tabela de Conversão para tEP médio**. 2007. Disponível em: <http://www.copel.com/pagcopel.nsf/9156440e0cd9d03783256bb8003b08cb/7afd40ed59b_d81890325723a0066ac56?OpenDocument>. Acesso em: 15 out. 2007.

COUTO, L.; MULLER, M.D.; TSUKAMOTO FILHO, A.A.. **I Conferência Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos vinte anos**. Campinas, SP, 2002. Disponível em: <http://www.cgu.unicamp.br/energia2020/papers/paper_Couto.pdf>. Acesso em: 15 set. 2007.

DUARTE, J.B. Princípios e utilização de técnicas multivariadas no melhoramento de plantas. **Monografia**. Departamento de Genética. ESALQ-USP. Piracicaba. 1997.

INEE - INSTITUTO NACIONAL PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Política para a madeira energética**. 2006, 16p.

LIMA, C.R.. Produtividade e equivalência energética de *Eucalyptus* sp. em relação ao óleo combustível e à energia elétrica. In: **Encontro de energia no meio rural**, n. 3, 2000, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100007&lng=en&nrm=abn>. Acesso

em: 03 nov. 2007.

MALIK, R.K.; GREEN, T.H.; BROWN, G.F.; BEYL, C.A.; SISTANI, K.R.; MAYS, D.A. Biomass production of short-rotation bioenergy hardwood plantations affected by cover crops. *Biomass and Bioenergy*, v. 21, n.1, p. 21-33, 2001.

MANLY, B.F.J. **Multivariate Statistical Methods- Primer**. Ed Chapman and Hall, London, 1986.

MEYER, L.F.; BRAGA, M.J. O crescimento das desigualdades tecnológicas na agricultura mineira. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 36, n. 1, p.59-89, 1998.

PEREIRA, J.C.D.; SCHAITZA, E.G.; SHIMIZU, J. Características físicas, químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Eucalyptus benthamii*. *Pesquisa em Andamento*, Colombo, n. 35, 1997, 2p.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira*, n. 89, 2005, p. 100-106. Disponível em: <www.funtec.org.br/arquivos/podercalorifico.pdf>. Acesso em: 10 out. 2007.

REMADE – **Revista da madeira**. Importância do eucalipto para a indústria de carvão vegetal. n. 59, 2001. Disponível em: <http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=59&id=5>. Acesso em: 29 mar. 2007.

SALVADOR, E.D.; COSTA, G.; TOMOTAKE, M.E.M.; JADOSKI, S.O. Levantamento preliminar da pteridoflora da região de Guarapuava (PR). *Revista Ambiente*, Guarapuava, PR v.1 n.2 p. 223-228 jul./dez. 2005. Disponível em: <<http://www.unicentro.br/editora/revistas/ambiente/v1n2/223-228.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2007.

SBS - Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Fatos e Números do Brasil Florestal**. São Paulo, 105p. 2006.

SÃO PAULO. Norma – PMQ 3-03. Norma que estabelece padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, 2003. Disponível em: <http://www.codeagro.sp.gov.br/qualidade_sp/texto_word/novos_arquivos/saa_10.doc>. Acesso em: 10 jun. 2007.

SOUZA, R.; KHAN, A.S. Modernização da agricultura e hierarquização dos municípios maranhenses. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 39, n.1, p.75-98, 2001.

SOUZA, C.R.; ROSSI, L.M.B.; AZEVEDO, C.P.; LIMA, R.M. B. Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. *Scientia Florestalis*, n.65, p.95-101, 2004.

THOMAZ, D.T. Avaliação da madeira e do carvão de *Eucalyptus badjensis* e *Eucalyptus benthamii* para uso energético. **Monografia**, PUC-PR, 2007, 26p.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 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*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

VALE, A.T.; COSTA, A.F.; GONÇALEZ, J.C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do Cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 89-95, 2001.

VELLA, M.M.C.F.; VALENTE, O.F.; VITAL, B.R.; LELLES, J.G. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. Piracicaba, **IPEF**, n. 41/42, p.64-76, 1989.