

Seleção de Clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadasSelection of *Eucalyptus* clones for the charcoal and bioenergy production by univariate and multivariate techniquesThiago de Paula Protásio¹, Allan Motta Couto²,
Aliny Aparecida dos Reis¹ e Paulo Fernando Trugilho³**Resumo**

O objetivo deste trabalho foi utilizar técnicas estatísticas univariadas e multivariadas para a seleção e avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia. Foram utilizados três clones de *Eucalyptus urophylla* e quatro de *Eucalyptus grandis*. Foram consideradas cinco árvores de cada clone, devidamente amostradas no sentido base-topo. De todas as árvores foi mensurado o diâmetro à altura do peito. Na madeira foram quantificados os teores de lignina total, extrativos totais, cinzas, holocelulose, carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre, além das densidades básica e energética, estoque de carbono por volume e poder calorífico superior. Procedeu-se às análises de variância univariadas e para o agrupamento dos clones utilizou-se o algoritmo de Scott-Knott. Foram realizadas ainda as análises de variância multivariada, de componentes principais e de variáveis canônicas visando agrupar os clones em grupos similares. As técnicas multivariadas foram mais eficientes no agrupamento e seleção dos clones de *Eucalyptus*. Observou-se que o teor de lignina total apresentou grande importância nos agrupamentos considerando as técnicas multivariadas empregadas. O clone U103 pode ser considerado o mais indicado para a produção de carvão vegetal e os clones U059 e U221 foram os mais recomendados para a produção de bioenergia.

Palavras-chave: composição da madeira, estatística, agrupamento, similaridade

Abstract

This work aimed at using univariate and multivariate statistical techniques for selection and evaluation of *Eucalyptus* clones for the production of charcoal and bioenergy. Three *Eucalyptus urophylla* clones and four *Eucalyptus grandis* clones were used. Five trees of each clone were sampled in base-top direction. Diameter at breast height was measured in all trees. Total lignin, total extractives, ashes, holocellulose, carbon, hydrogen, nitrogen and sulfur contents were quantified in the wood, also basic and energetic density and carbon stock by volume and higher heating value. Univariate variance analyses were used and the Scott-Knott algorithm was used for clone grouping. Multivariate variance analyses of principal components and canonical variables were also made aiming to group clones in similar groups. The multivariate techniques were more efficient in grouping and selection of *Eucalyptus* clones. It was observed that total lignin content was of great importance in grouping. Clone U103 was considered the most appropriate for charcoal production and clones U059 and U221 were recommended mostly for bioenergy production.

Keywords: wood composition, statistics, grouping, similarity.

INTRODUÇÃO

A biomassa florestal se destaca entre as fontes de energias renováveis como uma alternativa de substituição aos combustíveis fósseis, os quais são responsáveis por elevadas emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera (BRITO, 2007; MOREIRA, 2011). Nesse sentido, o

Brasil tem aproveitado seu potencial nas culturas agrícolas e florestais em relação ao resto do mundo no que se refere à utilização de energia renovável. O país apresenta atualmente quase 50% de sua matriz energética proveniente de fontes renováveis, sendo 14% correspondente às hidrelétricas e 32% a diversos tipos de biomassa (BRASIL, 2011).

¹Graduandos em Engenharia Florestal. UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras - MG. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com, alinyreis@hotmail.com

²Engenheiro Florestal, Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras - MG. E-mail: allan_floresta@yahoo.com.br

³Engenheiro Florestal, Pós-Doutor em Engenharia Florestal, Prof. Associado II. UFLA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras -MG. E-mail: trugilho@dcf.ufla.br

As florestas destinadas à produção de energia contribuem duplamente na redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera: a) no seu desenvolvimento, através da captura de CO₂ pela fotossíntese e; b) pela redução da emissão de carbono na sua substituição por combustíveis fósseis (MOREIRA, 2011).

Os plantios de *Eucalyptus* destacam-se entre as florestas plantadas devido ao seu rápido crescimento e alta produtividade, e também por ser uma grande alternativa ao uso da madeira nativa na produção madeireira no Brasil (RAMOS *et al.*, 2011). Em 2010, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* no Brasil totalizou 4.754.334 ha, cerca de 5,3% superior à área florestada em 2009, com destaque para o estado de Minas Gerais que apresenta a maior área plantada e o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do país (ABRAF, 2011).

Madeiras que são destinadas a produção de carvão vegetal e bioenergia devem apresentar características favoráveis, como elevados valores de densidade básica e poder calorífico, baixo teor de minerais e alto teor de lignina, características estas que garantem alto rendimento, baixo custo e elevada qualidade e produção do carvão vegetal (NEVES *et al.*, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2012a; TRUGILHO, 2009; TRUGILHO *et al.*, 2001; TRUGILHO *et al.*, 1997a).

Contudo, as variações da madeira verificadas nos diferentes clones de eucalipto ocorrem de forma diferenciada, dificultando o agrupamento de árvores dotadas de um número elevado de características desejáveis e correlacionadas favoravelmente entre si, dificultando os programas de melhoramento voltados à produção de madeira para energia (ADORNO; GARCIA, 2003). Nesse sentido, podem-se utilizar técnicas multivariadas para facilitar o agrupamento e seleção dos materiais genéticos e, dessa forma, detectar as variáveis mais relevantes.

As técnicas de análises multivariadas são ferramentas amplamente utilizadas em análises estruturais de florestas em estudos fitossociológicos, entretanto, alguns pesquisadores vêm aplicando estas técnicas para avaliação da biomassa vegetal com base nas propriedades químicas, físicas, mecânicas e anatômicas da madeira ou carvão vegetal (ASSIS *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2011; LOBÃO *et al.*, 2011; LOBÃO *et al.*, 2010; LOPES *et al.*, 2004; PROTÁSIO *et al.*, 2012b; TRUGILHO *et al.*, 2003; TRUGILHO *et al.*, 1997a; TRUGILHO *et al.*, 1997b).

Diante da necessidade da seleção de clones de eucalipto geneticamente superiores que garantam produtividade aliada à qualidade, o presente estudo teve como objetivo a seleção e avaliação de clones de *Eucalyptus* spp para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas estatísticas univariadas e multivariadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Material biológico e amostragem

Foram utilizadas madeiras de três clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake (U059, U103 e U221) e de quatro clones de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (G005, G085, G120 e G129), com idade de 42 meses, oriundos de teste clonal pertencente à ArcelorMittal Bioenergia, localizado em Martinho Campos, região Centro Oeste do estado de Minas Gerais. A região de coleta localiza-se a 19°19'S e 45°14'O e apresenta temperatura média anual e precipitação anual acumulada de 22 °C e 1150 mm, respectivamente.

A área do teste clonal passou pelo processo de subsolagem e adubação à base de 300 kg ha⁻¹ de fosfato Gafsa; posteriormente recebeu adubação complementar (cobertura) de 170 kg ha⁻¹ de NPK 6/30/6, Zn (1%), Cu (0,7%) e B (1%).

A área experimental, de aproximadamente seis hectares, foi subdivida em cinco áreas idênticas. Essas áreas não foram consideradas como blocos devido à proximidade entre as mesmas e ao fato de haver homogeneidade das condições silviculturais e edafoclimáticas, não sendo detectada a necessidade de controle local.

Foram coletadas cinco árvores de cada clone, sendo cada árvore amostrada em uma subdivisão da área experimental. As árvores amostradas foram aquelas que apresentaram diâmetro à altura do peito (DAP) mais próximo do diâmetro médio determinado pelo inventário florestal realizado de forma preliminar à amostragem dos indivíduos.

As árvores foram derrubadas e das quatro primeiras subdivisões foram retirados discos de aproximadamente 2,5 cm de espessura nas alturas relativas aos 2, 10, 30, 50 e 70% da altura comercial, considerada até o diâmetro de 5 cm com casca, conforme amostragem proposta por Downes *et al.* (1997); foi retirado também um disco extra na altura de 1,30 m de altura do solo (DAP). Já nas árvores da quinta subdivisão foram retirados discos de 2,5 cm de espessura na base, DAP e a partir dessa posição de metro em metro até a altura comercial do fuste.

Análises realizadas na madeira

De todas as árvores avaliadas foi mensurado o diâmetro à altura do peito (DAP ~ 1,30 m do solo), sendo que essa variável foi considerada nas análises estatísticas como parâmetro de seleção dos clones de *Eucalyptus*.

Para as análises químicas, físicas e energéticas realizadas na madeira foram consideradas amostras compostas por todas as posições longitudinais de amostragem nas árvores.

A densidade básica da madeira foi determinada segundo a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Foi obtida a densidade básica média da árvore (DBM) como sendo a média aritmética das posições longitudinais de amostragem.

O teor de extrativos totais foi determinado segundo a norma M3/69 (ABTCP, 1974a). Já o teor de lignina insolúvel (Klason) foi determinado segundo o procedimento descrito por Gomide e Demuner (1986). O teor de lignina solúvel em ácido sulfúrico foi determinado por meio de espectrofotometria conforme diretrizes de Goldschimid (1971). O teor de lignina total (LGT) foi considerado como sendo a soma das ligninas solúvel e insolúvel.

O teor de cinzas foi determinado segundo a norma M11/77 (ABTCP, 1974b). O teor de holo-celulose (Holo) foi determinado por diferença entre os demais componentes químicos da madeira [Holo-celulose (%) = 100% - Lignina total (%) - Extrativos totais (%) - Cinzas (%)].

Por meio da análise elementar realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), foi possível a quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) em relação à massa seca da madeira dos clones de *Eucalyptus* analisados. As amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada para o ensaio a fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. Amostras de 2 mg de cada árvore (amostra composta) foram completamente incineradas a 1200 °C. O teor de oxigênio (O) foi obtido por diferença [O (%) = 100 - C (%) - H (%) - N (%) - S (%)].

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em um calorímetro digital IKA C-200 conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). A densidade energética (DEM) foi obtida pelo produto do poder calorífico superior (PCS) e da densidade básica média da madeira (DBM), conforme apresentado na Equação 1:

$$DEM (Gcal m^{-3}) = [PCS (kcal kg^{-1}) * DBM (kg m^{-3})] / 10^6 \quad (1)$$

O estoque de carbono na madeira por unidade de volume (ECM) foi obtido multiplicando-se o teor de carbono da madeira pela densidade básica média (DB), conforme apresentado na Equação 2:

$$ECM (kg m^{-3}) = DBM (kg m^{-3}) * [Teor de carbono (\%)/100] \quad (2)$$

Análises estatísticas univariadas (ANOVAS)

Foram realizadas análises de variância univariadas utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para todas as variáveis quantificadas na madeira e considerando como fator de variação o efeito de clone.

De forma preliminar às análises de variância procedeu-se ao teste de homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett a 5% de significância). Além disso, verificou-se a normalidade dos resíduos (teste Shapiro-Wilk a 5% de significância). Para todas as variáveis avaliadas não foram observados desvios em relação a esses pressupostos da análise de variância, validando assim os resultados estatísticos obtidos.

Para a comparação múltipla das médias utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância. O teste proposto por Scott e Knott (1974) tem a finalidade de separar as médias em grupos distintos, por meio da minimização da variação dentro dos grupos e maximização da variação entre grupos. Lobão *et al.* (2011) mencionaram que para a separação das espécies dentro do mesmo grupo, o teste estatístico Scott-Knott apresenta a vantagem de ausência de ambiguidade dos testes de comparação múltipla de médias.

Análise de variância multivariada (MANOVA)

Foram consideradas as seguintes características da madeira: carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, lignina total, extrativos totais, cinzas, densidade básica, poder calorífico superior e o diâmetro a altura do peito (DAP) das árvores.

Segundo Hair Junior. *et al.* (2009), as variáveis dependentes (características avaliadas na madeira) além da condição de linearidade não devem ter multicolinearidade elevada, ou seja, as medidas dependentes redundantes devem ser eliminadas da análise, pois diminuem a eficiência estatística dos testes aplicados. Dessa forma, os teores de holo-celulose e oxigênio elementar, o estoque de carbono por volume e a densidade energética da madeira foram eliminados dessa análise estatística.

A análise de variância multivariada é uma técnica similar à análise de variância univariada. A diferença é que no modelo multivariado testa-se, simultaneamente, a igualdade de vetores de médias, ou seja, a análise é usada para inferir se os vetores de médias são todos iguais e se os vetores dos efeitos dos tratamentos são todos nulos (FERREIRA, 2008; HAIR JUNIOR, *et al.*, 2009). O teste de significância multivariado utilizado foi o critério de Wilks com aproximação da distribuição F.

Análise de componentes principais (PCA)

Foram utilizadas apenas as médias de todas as variáveis quantificadas na madeira e a análise de componentes principais foi realizada considerando-se os dados padronizados (com variância unitária). Esse procedimento permite maior acurácia na análise (MINGOTI, 2005).

A relação entre as variáveis (multicolinearidade) não é um problema nesta análise. O objetivo básico da análise de componentes principais é obter variáveis latentes que representam combinações lineares de um grupo de variáveis sob estudo que são, por sua vez, correlacionadas (CHA-TFIELD; COLLINS, 1995; FERREIRA, 2008).

Por meio da dispersão dos escores das componentes principais consideradas foi possível avaliar a similaridade ou dissimilaridade dos clones e assim agrupá-los em subgrupos definidos, ou seja, os mais semelhantes pertencem ao mesmo grupo e os clones que são heterogêneos entre si, pertencem a grupos distintos (FERREIRA, 2008; LOBÃO *et al.*, 2011; MINGOTI, 2005).

Além disso, com base nos escores referentes às duas primeiras componentes principais foi determinada a matriz de dissimilaridade entre os clones considerando a distância euclidiana quadrática.

Análise de variáveis canônicas

Procedeu-se a análise de variáveis canônicas para as características avaliadas na madeira, desconsiderando as variáveis redundantes (holocelulose, densidade energética, estoque de carbono por volume e oxigênio).

A análise de variáveis canônicas é um procedimento estatístico multivariado para avaliação do grau de similaridade entre elementos amostrais que no presente estudo são os clones de *Eucalyptus*, levando em consideração tanto a matriz de covariância residual quanto a de covariância fenotípica entre os caracteres avaliados (CRUZ; REGAZZI, 1994).

O objetivo principal dessa análise é proporcionar a simplificação estrutural dos dados, de forma que a divergência, influenciada, em princípio, por um conjunto p-dimensional, possa ser avaliada por um conjunto bi ou tridimensional de fácil interpretação (CRUZ; REGAZZI, 1994; TRUGILHO, 1995).

À semelhança da análise de componentes principais a técnica de análise por variáveis canônicas consiste em transformar os dados originais em um conjunto de novas variáveis não correlacionadas, que são uma combinação linear das variáveis originais (TRUGILHO, 1995).

O teste multivariado utilizado foi o critério de Wilks com aproximação da distribuição F para verificar se a variável canônica é estatisticamente diferente de zero.

Com base nos escores referentes às duas primeiras variáveis canônicas foi determinada a matriz de dissimilaridade entre os clones considerando a distância euclidiana quadrática. Além disso, foram obtidos círculos de confiança a 5% de significância para os clones de *Eucalyptus* com base nas duas primeiras variáveis latentes e, conseqüentemente, a formação de grupos similares.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software R versão 2.14.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011). As análises de variância univariadas e multivariada foram realizadas por meio do pacote básico do R (pacote stats) (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

Para a análise de componentes principais (PCA) utilizou-se o pacote stats (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011) e SensoMineR (HUS-SON *et al.*, 2012), para as comparações múltiplas de médias (teste Scott-Knott) o pacote laercio (SILVA, 2010) e para a análise de variáveis canônicas o pacote candisc (FRIENDLY; FOX, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de variância multivariada (MANOVA)

Pela análise de variância multivariada observou-se efeito significativo de clone (p-valor <0,001) para os vetores de médias das seguintes características avaliadas: DAP, densidade básica, lignina total, extrativos totais, cinzas, poder calorífico superior, carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Esse resultado é um indicativo de que o efeito de clone nas características consideradas não são todos nulos.

Dessa forma, pode-se submeter à seleção de clones mais propícios para a produção de

carvão vegetal, bem como ao agrupamento de indivíduos similares com base nas análises de componentes principais, variáveis canônicas e por meio do algoritmo de Scott-Knott.

Análises de variância univariadas (ANOVAS)

Pelo Teste F observou-se efeito significativo de clone (p -valor $< 0,05$) para todas as características avaliadas, com exceção do teor de hidrogênio e para o diâmetro a altura do peito (DAP), corroborando com a análise de variância multivariada realizada. Logo, espera-se para cada variável quantificada na madeira que pelo menos um dos clones avaliados seja diferente dos demais.

Na Figura 1 estão apresentados os valores médios para a densidade básica e estoque de carbono por unidade de volume na madeira dos sete clones de *Eucalyptus*.

Observa-se que para a densidade básica foi possível agrupar os clones em dois grupos distintos, sendo que os clones U059 e U221 de *Eucalyptus urophylla* apresentaram estatisticamente valores mais elevados.

Dessa forma, pode-se inferir que visando à otimização da densidade relativa aparente do carvão vegetal deve-se carbonizar a madeira advinda desses clones, uma vez que quanto maior a densidade básica maior a densidade relativa aparente do carvão (TRUGILHO *et al.*, 1997a; VALE *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2001) e mais re-

sistente será esse biocombustível à abrasão nos altos fornos siderúrgicos. Além disso, quanto maior a densidade da madeira maior será a quantidade de massa por unidade de volume, portanto, maior será a produção de carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2012a).

No entanto, é necessário mencionar que a densidade básica não é um parâmetro único de avaliação da potencialidade dos clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal, deve-se considerar também a produtividade de massa seca, bem como o teor de lignina e as características anatômicas da madeira como a espessura e a largura da parede celular, pois essas características se relacionam diretamente com a produtividade e a qualidade do carvão vegetal (LIMA *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2012a; TRUGILHO, 2009; TRUGILHO *et al.*, 2001; TRUGILHO *et al.*, 1997a).

Observou-se ainda que o coeficiente de variação entre os valores de densidade básica dos clones, considerando todas as árvores, foi de apenas 8,64%. Esse resultado reforça a necessidade de considerar as demais características da madeira para a seleção e agrupamento dos clones.

Quanto ao estoque de carbono na madeira observa-se um resultado diferente daquele obtido para a densidade básica. Os clones G085, G129 e U103, apesar dos menores valores de densidade básica, apresentaram estoque em carbono por unidade de volume estatisticamente igual aos clones U059 e U221.

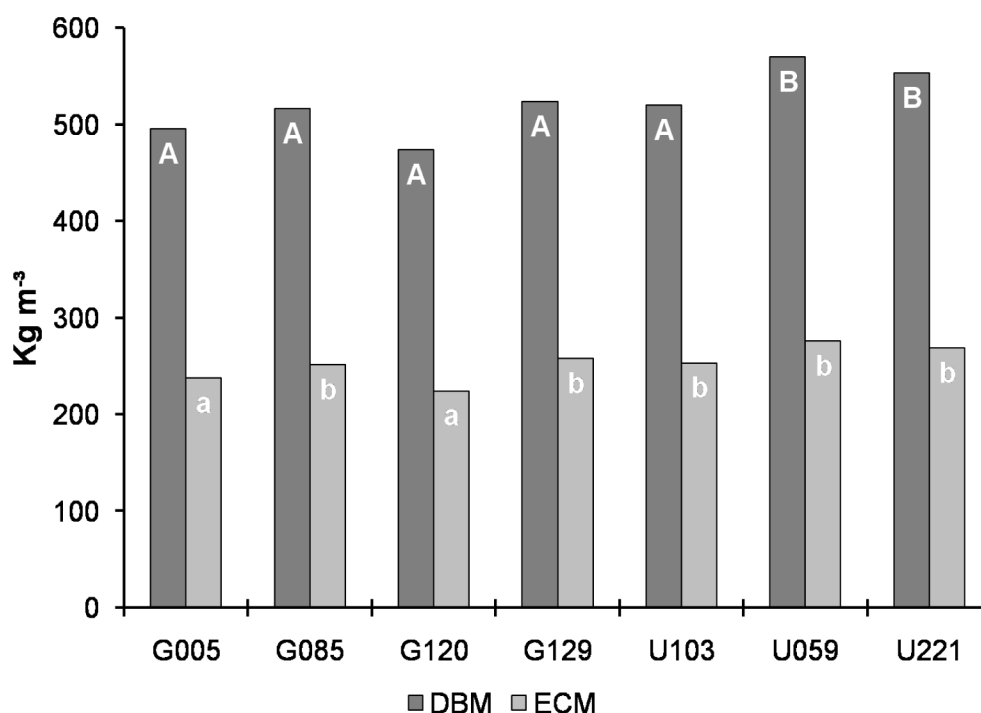


Figura 1. Densidade básica média (DBM) e estoque em carbono por volume (ECM) da madeira dos clones de *Eucalyptus*. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste Scott-Knott.

Figure 1. Mean basic density (ABD) and carbon stock by volume (SCW) of *Eucalyptus* clonal wood. Means followed by the same letter do not differ by the Scott-Knott test at 5% significance level.

Esse resultado é um indicativo da importância dessa variável, pois ela considera simultaneamente duas características importantes para a seleção de clones de eucalipto para a produção de bioenergia e carvão vegetal: o carbono e a densidade. O carbono é o principal constituinte químico elementar responsável pela geração de energia e apresenta relação direta com o poder calorífico (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; HUANG *et al.*, 2009; OBERNBERGER *et al.*, 2006; PAULA *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011; SENELWA; SIMS, 1999). Dessa forma, quanto maior o estoque de carbono maior será a produção de bioenergia, considerando a madeira *in natura*.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios de extrativos totais, lignina total, cinzas, holocelulose, densidade energética da madeira e diâmetro a altura do peito (DAP) dos clones de *Eucalyptus*.

Os resultados encontrados para a densidade energética são similares aos observados para a densidade básica, ou seja, os clones U059 e U221 formaram um único grupo e apresentaram os valores mais elevados. Isso ocorreu devido à maior densidade básica da madeira desses clones.

Considerando o teor de extrativos totais nota-se a formação de dois grupos de clones similares, sendo que o grupo formado pelos clones G129 e U059 apresentou estatisticamente valores médios mais elevados. Dependendo da constituição química dos extrativos, bem como da sua resistência à degradação térmica, a sua maior porcentagem poderá ser benéfica para a produção de energia e carvão vegetal, resultando em um acréscimo do poder calorífico e do rendimento em carbono fixo (PROTÁSIO *et al.*, 2012a ; SANTOS, 2010; SANTOS *et al.*, 2011).

Quanto ao teor de lignina observa-se a formação de três grupos distintos. O clone U103 mostrou-se divergente em relação aos demais e

apresentou o maior teor de lignina total. Dessa forma, mesmo não sendo o de maior densidade, esse clone apresentou a maior produção de lignina total por volume (182,47 kg m⁻³) em relação à massa seca de madeira.

A lignina, além de maximizar o poder calorífico da biomassa vegetal (DEMIRBAS, 2001) devido ao seu maior teor de carbono, apresenta elevada estabilidade térmica e correlaciona-se diretamente com a qualidade e produção do carvão vegetal (SHAFIZADEH, 1985; TRUGILHO *et al.*, 1997a; VALE *et al.*, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2012a). Há relatos na literatura de acréscimo da densidade relativa aparente do carvão vegetal com o acréscimo do teor de lignina para espécies do cerrado (VALE *et al.*, 2010).

Avaliando-se o teor de cinzas na madeira observa-se que os clones G005, G120 e U103 formaram um único grupo e apresentaram os maiores valores médios.

Os minerais presentes na madeira não participam do processo de combustão, logo apresentam correlação negativa com o poder calorífico superior (BRAND, 2010). Além disso, a presença de cinzas no carvão vegetal pode ocasionar uma diminuição da resistência mecânica do ferro gusa ou do aço, bem como dos ferros liga.

São relatados na literatura baixos valores para o teor de cinzas (em base seca) na madeira de eucalipto variando de 0,07% a 1% (MORI *et al.*, 2003; NEVES *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011; TRUGILHO *et al.*, 2003; TRUGILHO *et al.*, 1996), assemelhando-se ao observado neste trabalho. Dessa forma, os baixos valores observados para o teor de cinzas dos clones avaliados não comprometem a sua utilização bioenergética.

Se o objetivo for a produção de carvão vegetal deve-se optar por madeiras que apresentem baixos teores de holocelulose (PROTÁSIO *et al.*, 2012a), uma vez que as hemiceluloses e a celulo-

Tabela 1. Valores médios de extrativos totais, lignina total, cinzas, holocelulose, densidade energética da madeira (DEM) e diâmetro a altura do peito (DAP) dos clones de *Eucalyptus*.

Table 1. Mean values of total extractives, total lignin, ashes, holocellulose, energetic density of wood (EDW) and diameter at breast height (DBH) of the *Eucalyptus* clones.

Clone	Extrativos (%)	Lignina total (%)	Cinzas (%)	Holocelulose (%)	DEM (Gcal m ⁻³)	DAP (cm)
G005	3,36 A	31,88 B	0,338 B	64,42 B	2,252 A	15,28 A
G085	3,50 A	31,73 B	0,259 A	64,51 B	2,383 A	14,80 A
G120	3,61 A	29,33 A	0,314 B	66,74 C	2,162 A	14,39 A
G129	5,51 B	32,86 B	0,230 A	61,41 A	2,384 A	13,78 A
U059	4,99 B	30,96 B	0,239 A	63,81 B	2,574 B	13,72 A
U103	4,30 A	35,12 C	0,324 B	60,26 A	2,367 A	16,04 A
U221	3,84 A	28,01 A	0,258 A	67,89 C	2,564 B	15,31 A
Média	4,16	31,41	0,28	64,15	2,38	14,76
Desvio	0,82	2,32	0,04	2,70	0,15	0,90

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

se apresentam um perfil bastante instável diante da degradação térmica (SHAFIZADEH, 1985). Logo, espera-se que quanto maior o teor de holocelulose menor será o rendimento e a qualidade do carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2012a).

Nesse sentido, os clones U221 e G120 mostraram-se similares e apresentaram valores mais elevados de holocelulose. O contrário foi observado para os clones U103 e G129. Esses clones podem ser considerados com elevado potencial para a produção de carvão vegetal.

A composição elementar e poder calorífico superior (PCS) da madeira dos clones de *Eucalyptus*, bem como os grupos obtidos pelo algoritmo de Scott-Knott, estão apresentados na Tabela 2.

Estatisticamente, observa-se que os clones G085 e U221 apresentaram valores mais elevados para o poder calorífico superior, sendo considerados similares para essa característica. Os demais clones apresentaram os menores valores. Contudo, do ponto de vista prático, para a geração de energia, consideram-se diferenças superiores no PCS de 300 kcal kg⁻¹ (BRAND, 2010). Logo, pode-se considerar a variação encontrada de ± 41,73 kcal kg⁻¹, em relação à média geral, como não significativa.

Quanto à análise da composição química elementar nota-se que para o teor de hidrogênio não foi encontrada diferença significativa entre as médias dos clones. Esse resultado evidencia que essa variável não pode ser considerada como um parâmetro de seleção, uma vez que todos os clones de *Eucalyptus* avaliados foram considerados similares e, portanto, um único grupo.

Já para os teores de carbono e oxigênio observa-se a formação de dois grupos distintos, sendo que os clones G005 e G120 formaram um grupo com os menores e os maiores valores médios de carbono e oxigênio na madeira, respectivamente.

A avaliação do percentual de carbono é um importante parâmetro para verificar a potencialidade energética da biomassa vegetal, uma vez que pequenas variações nessa característica podem resultar em um aumento considerável no poder calorífico (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; HUANG *et al.*, 2009; PAULA *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011). O teor de oxigênio, por sua vez, apresenta relação negativa com o poder calorífico. Logo, acréscimos no teor de oxigênio da biomassa tendem a diminuir o seu valor calórico (DEMIRBAS, 1997; HUANG *et al.*, 2009; NORDIN, 1994; PAULA *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Além dos percentuais totais dos componentes químicos elementares deve-se considerar ainda a influência da interação entre eles no poder calorífico da biomassa vegetal. Isso explicaria parcialmente os resultados observados neste estudo. Nota-se que os clones G129, U059 e U103, apesar de integrarem o grupo com o maior teor de carbono e menor teor de oxigênio, não apresentaram estatisticamente o maior poder calorífico superior.

Quanto aos teores de enxofre e nitrogênio, altas concentrações desses elementos na biomassa vegetal resultam em poluição atmosférica após a combustão e, conseqüentemente, produzem corrosão e chuva ácida devido à formação de compostos SO_x e NO_x (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; DEMIRBAS, 2004). Altas concentrações de nitrogênio na biomassa resultam ainda na diminuição do poder calorífico superior (HUANG *et al.*, 2009).

Diante disso, observa-se que o clone G120 avaliado apresentou estatisticamente os valores mais elevados de nitrogênio e enxofre na sua composição elementar em relação aos demais materiais genéticos avaliados. Contudo, os valores observados podem ser considerados pequenos e não comprometem a utilização energéti-

Tabela 2. Composição elementar e poder calorífico superior (PCS) da madeira dos clones de *Eucalyptus*.
Table 2. Elemental composition and higher heating value (HHV) of *Eucalyptus* clones wood.

Clone	Nitrogênio	Carbono	% em massa seca			PCS (kcal kg ⁻¹)
			Hidrogênio	Enxofre	Oxigênio*	
G005	0,07 A	47,98 A	6,26 A	0,18 A	45,50 B	4548,8 A
G085	0,08 A	48,61 B	6,32 A	0,17 A	44,81 A	4618,2 B
G120	0,14 B	47,24 A	6,27 A	0,37 B	45,98 B	4570,8 A
G129	0,10 A	49,26 B	6,31 A	0,23 A	44,10 A	4555,8 A
U059	0,09 A	48,35 B	6,24 A	0,19 A	45,13 A	4518,4 A
U103	0,09 A	48,68 B	6,31 A	0,14 A	44,77 A	4555,2 A
U221	0,09 A	48,58 B	6,28 A	0,14 A	44,90 A	4638,0 B
Média	0,10	48,39	6,29	0,20	45,03	4572,17
Desvio	0,02	0,63	0,03	0,08	0,60	41,73

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo teste Scott-Knott;

*: aplicado o teste de Scott-Knott a 6% de significância.

ca da madeira dos clones de *Eucalyptus*. A baixa quantidade de enxofre na madeira certamente irá resultar em um carvão vegetal com baixa concentração desse elemento e, conseqüentemente, de melhor qualidade.

Análise de componentes principais (PCA)

Na Tabela 3 encontram-se os autovetores e a contribuição das variáveis originais nas duas primeiras componentes principais, bem como a variância explicada por essas variáveis latentes. Observa-se que as duas primeiras componentes principais apresentaram os maiores autovalores e explicaram 65% da variância total dos dados.

Analisando-se a primeira componente principal observa-se que os maiores autovetores positivos são relativos à densidade básica, teor de carbono, densidade energética, estoque de carbono por volume e teor de extrativos totais. Os autovetores negativos mais significativos referem-se aos teores de oxigênio, enxofre e cinzas. Logo, quanto maior o valor dessa componente (escore) mais propício será o clone de eucalipto para a geração de energia (considerando a madeira in natura) e carvão vegetal.

Quanto à componente principal 2 observam-se autovetores negativos e significativos referentes às variáveis: DAP, lignina total e hidrogênio elementar. Para o teor de holocelulose foi obtido um autovetor positivo e com elevada contribuição nessa componente principal. Logo, quanto menores os escores dessa componente principal mais propício será o clone de eucalipto para a produção de carvão, pois maior será o seu teor de lignina e menor será o seu teor de holocelulose.

Diante dos autovetores obtidos pode-se afirmar que as duas primeiras componentes principais reúnem características favoráveis e mais relevantes para a seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. Nota-se ainda que o poder calorífico superior e o teor de nitrogênio apresentaram autovetores pouco expressivos nas componentes principais 1 e 2. Dessa forma, essas variáveis podem ser consideradas de baixa relevância no processo de agrupamento dos clones tendo como base as duas primeiras componentes analisadas.

A dispersão dos clones de *Eucalyptus* em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores das duas primeiras componentes principais para as características da madeira pode ser visualizada na Figura 2.

A Tabela 4 apresenta a matriz de dissimilaridade entre os clones avaliados considerando os escores das duas primeiras componentes principais para as características da madeira.

Tabela 4. Matriz de dissimilaridade entre os clones avaliados considerando os escores das duas primeiras componentes principais para as características da madeira.

Table 4. Dissimilarity matrix of the evaluated clones considering the scores of the first two principal components for wood characteristics.

Clone	G005	G085	G120	G129	U059	U103
G085	2,37					
G120	3,44	5,33				
G129	4,17	1,82	7,09			
U059	4,93	3,08	6,66	2,70		
U103	3,18	2,23	6,61	2,69	5,04	
U221	4,16	2,56	5,78	2,74	0,88	4,70

Tabela 3. Autovetores e contribuição das variáveis originais (Cont) nas duas primeiras componentes principais.

Table 3. Eigenvectors and contributions of the original variables (Cont) in the first two principle components.

Variáveis Originais	Componente 1		Componente 2	
	Autovetores	Cont (%)	Autovetores	Cont (%)
Diâmetro a altura do peito (DAP)	-0,059	0,34	-0,323	10,44
Densidade básica (DBM)	0,340	11,56	0,256	6,57
Extrativos totais	0,279	7,77	0,053	0,28
Lignina total (LGT)	0,132	1,74	-0,490	23,99
Cinzas	-0,288	8,31	-0,300	9,00
Nitrogênio (N)	-0,222	4,95	0,164	2,68
Carbono (C)	0,376	14,16	-0,146	2,13
Hidrogênio (H)	0,112	1,25	-0,352	12,37
Enxofre (S)	-0,290	8,40	0,141	1,98
Oxigênio (O)	-0,359	12,92	0,150	2,26
Poder calorífico superior (PCS)	-0,009	0,01	0,082	0,67
Holocelulose (Holo)	-0,193	3,71	0,409	16,77
Densidade energética (DEM)	0,337	11,33	0,258	6,67
Estoque de carbono (ECM)	0,368	13,57	0,205	4,19
Autovalores	5,97		3,10	
Variância acumulada (%)	42,67		64,84	

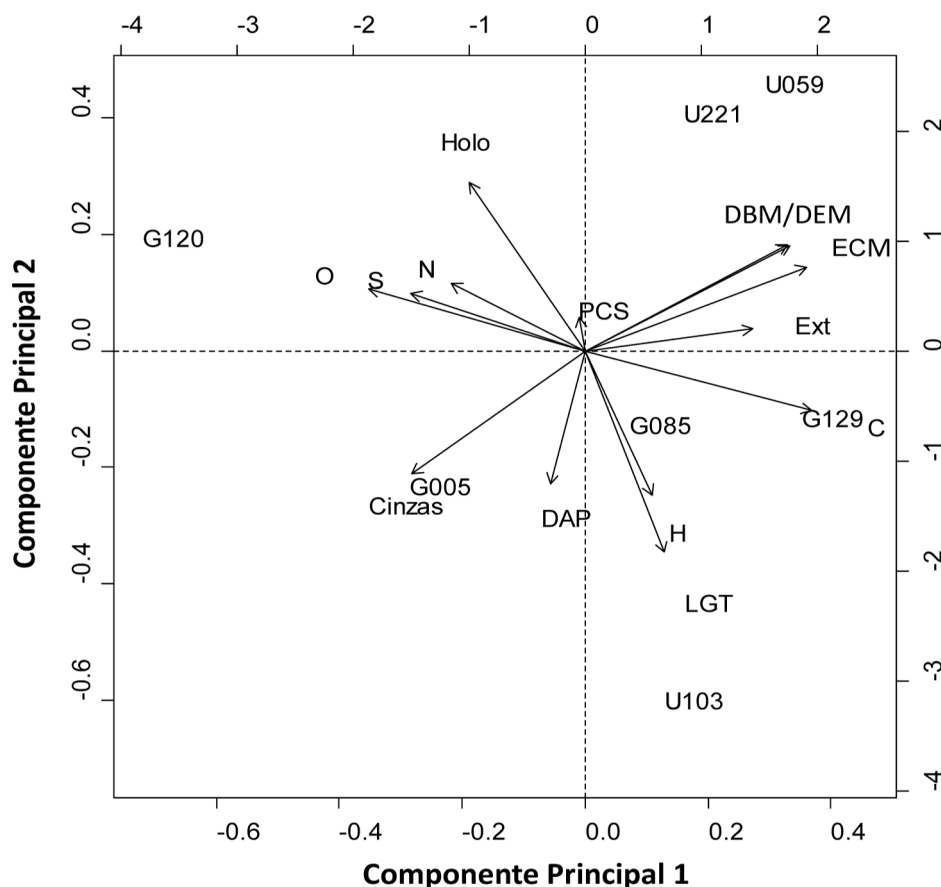


Figura 2. Dispersão dos clones de *Eucalyptus* em função dos escores e diagrama de ordenação dos autovetores das duas primeiras componentes principais.

Figure 2. Dispersion of *Eucalyptus* clones according to scores and diagram of eigenvectors ordination in the first two principal components.

Observa-se a similaridade dos clones U221 e U059 (0,88), sendo que a densidade básica, a densidade energética e o estoque de carbono por volume foram as características mais relevantes no agrupamento desses dois clones.

Os clones G085 e G129 podem ser considerados como um único grupo em decorrência da sua similaridade obtida por meio da distância euclidiana. Já o clone U103 pode ser considerado um grupo isolado, principalmente devido ao seu elevado teor de lignina total.

Analisando-se os escores das componentes principais e a matriz de dissimilaridade obtida observa-se que o clone G120 foi o mais dissi-

milar ou divergente se comparado aos demais. Isso ocorreu basicamente devido aos elevados teores de holocelulose, oxigênio, nitrogênio e enxofre e ao baixo teor de lignina observado para esse clone. O clone G005 também pode ser considerado como um único grupo, pois está mais distante dos clones G085, G129 e U103 e encontra-se isolado em um dos quadrantes da Figura 2.

Análise de variáveis canônicas

Na Tabela 5 encontram-se as estatísticas utilizadas na avaliação das seis primeiras variáveis canônicas.

Tabela 5. Estatísticas utilizadas na avaliação das seis primeiras variáveis canônicas.

Table 5. Statistics used in the evaluation of the six first canonical variables.

Variável canônica	R ² canônico	Autovalor	F aproximado	α	VEP	VAC
1	0,87494	6,99612	8,39	0,001	46,66	46,66
2	0,82168	4,60779	6,76	0,001	30,73	77,38
3	0,67291	2,05723	5,03	0,001	13,72	91,10
4	0,42927	0,75216	3,88	0,001	5,02	96,12
5	0,27247	0,37452	3,89	0,01	2,50	98,62
6	0,17173	0,20734	5,81	0,05	1,38	100,00

α: nível de significância; VEP: variância explicada (%); VAC: variância explicada acumulada (%).

Observa-se que as duas primeiras variáveis canônicas foram estatisticamente significativas, explicaram quase 80% da variância total dos dados e apresentaram elevado R² canônico. Logo, as informações mais relevantes dos dados originais estão contidas nessas duas variáveis canônicas.

Observou-se que a densidade básica da madeira, ao contrário do obtido pela análise de componentes principais, apresentou baixa correlação com as variáveis canônicas 1 e 2, de -0,07 e 0,15, respectivamente. Dessa forma, essa característica da madeira não foi decisiva para o agrupamento dos clones por meio da análise de variáveis canônicas.

O teor de lignina total apresentou alta correlação com a variável canônica 1 (0,86). Esse resultado é similar àquele observado pela análise de componentes principais e reforça a importância do teor de lignina na seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal.

Já na variável canônica 2, o poder calorífico superior e o teor de enxofre apresentaram, em módulo, as maiores correlações. Contudo, o poder calorífico superior da madeira apresentou baixa variação entre os clones e o teor de enxofre observado não compromete a utilização bioenergética da madeira. Logo, a variável canônica 2 obtida apresentou baixa importância prática.

Na Figura 3 é apresentado o agrupamento dos clones de *Eucalyptus* por meio das duas primeiras variáveis canônicas, bem como os círculos de confiança a 5% de significância.

A matriz de dissimilaridade entre os clones avaliados considerando os escores das duas primeiras variáveis canônicas encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6. Matriz de dissimilaridade entre os clones avaliados considerando os escores das duas primeiras variáveis canônicas.

Table 6. Dissimilarity matrix of the evaluated clones considering the scores of the first two canonical variables.

Clone	G005	G085	G120	G129	U059	U103
G085	1,71					
G120	5,45	5,15				
G129	2,78	3,33	3,05			
U059	3,69	3,94	2,09	1,00		
U103	2,63	4,24	7,51	4,48	5,48	
U221	5,37	3,70	5,52	5,75	5,73	7,94

Analisando-se os círculos de confiança obtidos para os escores das duas primeiras variáveis canônicas, bem como a matriz de dissimilaridade, pode-se constatar a formação de 5 grupos de clones distintos.

O clone U221 pode ser considerado, de maneira geral, o mais dissimilar em relação aos demais, sendo que o poder calorífico superior foi

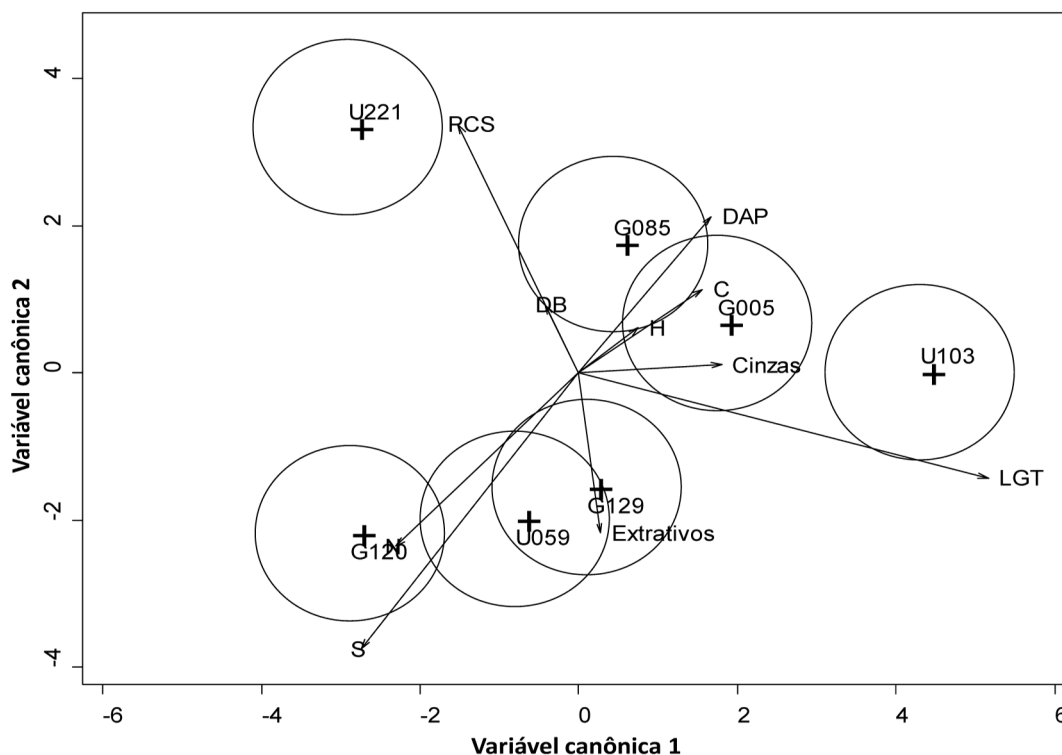


Figura 3. Dispersão dos escores, correlação das variáveis originais com as duas primeiras variáveis canônicas e círculos de confiança ($\alpha = 0,05$).

Figure 3. Dispersion of scores, correlation of original variables with the first two canonical variables and confidence circles ($\alpha = 0,05$).

a variável mais relevante neste resultado. Contudo, pelas análises univariadas observou-se que a diferença entre o PCS dos clones pode ser considerada não significativa.

Os clones G085 e G005 são similares e formaram um único grupo. Já o clone U103 apresenta-se como um único grupo, assemelhando-se ao observado pela análise de componentes principais. Observa-se que o teor de lignina foi a característica da madeira mais relevante na formação desses dois grupos.

Devido à influência do teor de extrativos totais os clones U059 e G129 foram os mais similares resultando em uma distância euclidiana igual a 1. O clone G120 pode ser considerado um único grupo e dissimilar em relação aos demais, sendo que os teores de nitrogênio e enxofre foram as variáveis originais mais relevantes neste resultado.

Os agrupamentos obtidos pelas análises de componentes principais e por meio das variáveis canônicas foram diferentes, uma vez que as variáveis canônicas levam em consideração tanto a matriz de covariância residual quanto a matriz de covariância fenotípica.

As variáveis canônicas explicaram a maior parte da variância total dos dados, mas a densidade básica da madeira, característica fundamental na avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal, apresentou baixa correlação com as variáveis canônicas.

Esse resultado, por sua vez, não foi observado pela análise de componentes principais, em que a densidade básica apresentou grande importância na classificação, seleção e agrupamento dos clones. Contudo, o teor de lignina total apresentou relevante influência nos agrupamentos obtidos tanto pela análise de componentes principais quanto pelas variáveis canônicas.

CONCLUSÕES

As técnicas de análises multivariadas foram mais eficientes no agrupamento e na seleção dos clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia. Observou-se que o teor de lignina total apresentou grande importância no agrupamento dos clones considerando-se as análises de componentes principais e de variáveis canônicas.

O clone U103 pode ser considerado o mais indicado para a produção de carvão vegetal, pois apresentou elevado teor de lignina total e mostrou-se dissimilar em relação aos demais por meio das técnicas estatísticas utilizadas.

Já os clones U059 e U221 podem ser utilizados para a geração de bioenergia considerando a madeira in natura, pois apresentaram elevados valores de densidade básica e energética.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, Fapemig e Capes pelo apoio financeiro, à ArcelorMittal Bioenergia pela doação do material biológico utilizado, ao Prof. Dr. Daniel Furtado Ferreira pelo suporte estatístico e à equipe do Laboratório Multiusuário de Biomateriais (Universidade Federal de Lavras).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS. Anuário estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília: ABRAF, 2011. 130p.

ABTCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. M3/69: métodos de ensaio. São Paulo, 1974a. 8p.

ABTCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. M11/77: teor de cinzas. São Paulo, 1974b. 8p.

ADORNO, M.F.C., GARCIA, J.N. Correlações lineares entre as principais características tecnológicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.63, p.44-53, 2003.

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.

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. *Applied Energy*, London, v.85, n.8, p.776-785, 2008.

- BRAND, M.A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2011: ano base 2010**. Rio de Janeiro: MME, 2010. 266p.
- BRITO, J.O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.21, n.59, p.185-193, 2007.
- CHATFIELD, C.; COLLINS, A.J. **Introduction to multivariate analysis**. 7ed. London: Chapman & Hall, 1995. 246p.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFMG, Impr. Univ., 1994. 390p.
- DERMIBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Pittsburgh, v.30, n.2, p.219-230, 2004.
- DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.42, n.2, p.183-188, 2001.
- DEMIRBAS, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel**, v.76, n.5, p.431-434, 1997.
- DEMIRBAS, A; DEMIRBAS, H.A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. **Journal Energy, Exploration & Exploitation**, v.20, n.1, p.105-111, 2004.
- DOWNES, G.M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H. MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R. MUNERI, A. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties**. Collingwood, Vic.: CSIRO Australia, 1997. 126p.
- FERREIRA, D.F. **Estatística Multivariada**. Lavras: UFLA, 2008. 662p.
- FRIENDLY, M; FOX, J. **candisc: Generalized Canonical Discriminant Analysis**. R package version 0.5-19. 2010. Disponível em: <http://CRAN.R-project.org/package=candisc>. Acesso em 20 fev. 2012.
- GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reations**. New York: John Wiley & Sons, 1971. p.241-266.
- GOMIDE, J.L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v.47, n.8, p.36-38, 1986.
- HAIR JUNIOR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.
- HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, v.29, n.6, p.1793-1797, 2009.
- HUSSON, F; LE, S.; CADORET, M. **SensoryMineR: Sensory data analysis with R**. R package version 1.15. 2012. Disponível em: <http://cran.rproject.org/web/packages/SensoryMineR/index.html>. Acesso em: 14 out. 2012.
- LIMA, E.A.; SILVA, H.D.; LAVORANTI, O.J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.65, p.09-17, 2011.
- LOBÃO, M.S.; CASTRO, V.R.; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA JUNIOR, F.G.S.; CAMARGO NETO, L.; BERMUDEZ, M.A.R.C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n.92, p.469-477, 2011.
- LOBÃO, M.S.; CHAGAS, M.P.; COSTA, D.S.P.; FERREIRA, A.T.B.; SETTE JUNIOR, C.R.; CARVALHO, I.L.; FO, M.T. Agrupamento de espécies florestais pela similaridade das características físico-anatômicas e usos da madeira. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 97-105, 2010.
- LOPES, M.C.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J.; LONGHI, S.J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D.L.G.; MENEZES, L.F. Agrupamento de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis* em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.14, n.2, p.133-144, 2004.
- MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297p.

- MOREIRA, J.M.M.A.P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.68, p.363-372, 2011.
- MORI, F.A.; MENDES, L.M.; TRUGILHO, P.F.; CARDOSO, M.G. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.3, p.396-400, 2003.
- 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.
- NORDIN, A. Chemical elemental characteristics of biomass fuels. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v.6, n.5, p.339-347, 1994.
- OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v.30, n.11, p.973-982, 2006.
- OLIVEIRA, A.C.; CANEIRO, 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.
- PAULA, L.E.R.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v.17, n.2, p.237-246, 2011.
- PROTÁSIO, T.P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G.H.D.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.66, p.122-133, 2011.
- 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, SP, v.40, n.95, p.317-326, 2012a.
- PROTÁSIO, T.P.; TONOLI, G.H.D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; BUFALINO, L.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P. F. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, Lavras, v.18, n.3, p.433-439, 2012b.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 04 mar. 2012.
- RAMOS, L.M.A.; LATORRACA, J.V.F.; PASTRO, M.S.; SOUZA, M.T.; GARCIA, R.A.; CARVALHO, A.M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n.92, p.411-418, 2011.
- SANTOS, R.C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- 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.
- SCOTT, A.J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v.30, n.2 p.507-512, 1974.
- SENELWA, K.; SIMS, R.E.H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v.17, n.2, p.127-140, 1999.
- SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: OVEREND, R.P.; MILNE, T. A.; MUDGE, L.K. **Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion**. London: Elsevier, 1985. p.183-217.
- SILVA, L.J. **Duncan test, Tukey test and Scott-Knott test**. R package version 2.11.1. 2010. Disponível em: <http://cran.r.c3sl.ufpr.br/>. Acesso em: 12 out. 2011.
- TRUGILHO, P.F. Densidade básica e estimativa de massa seca e lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.5, p.122 - 239, 2009.
- TRUGILHO, P.F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus**. 1995. 160p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, Lavras, v.2, n.1, p.94-111, 1996.
- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, Lavras, v.9, n.1, p.66-80, 2003.
- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Cerne*, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 2001.
- TRUGILHO, P.F.; VITAL, B.R.; REGAZZI, A.J.; GOMIDE, J.L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 21, n. 2, p.259-267, 1997a.
- TRUGILHO, P.F.; REGAZZI, A.J.; VITAL, B.R.; GOMIDE, J.L. Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus* e seleção de genótipos superiores para produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 21, n.1, p.113-130, 1997b.
- 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, v.25, n 89, p.89-95, 2001.
- VALE, A.T.; DIAS, I.S.; SANTANA, M.A.E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.20, n.1, p.137-145, 2010.

Recebido em 07/03/2012
Aceito para publicação em 05/11/2012