

Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*Canonical correlation analysis between characteristics of *Eucalyptus* wood and charcoalThiago de Paula Protásio¹, Paulo Fernando Trugilho²,
Thiago Andrade Neves³ e Carlos Magno Melo Vieira⁴**Resumo**

Objetivou-se utilizar a análise de correlação canônica para verificar as associações existentes entre o grupo formado pelas características da madeira de clones de *Eucalyptus* com o grupo formado pelas características do carvão vegetal dela obtido, com enfoque para o método de avaliação não destrutivo denominado Pilodyn. Foram utilizados sete clones de *Eucalyptus* e 24 observações amostrais. Utilizou-se o teste multivariado Lambda de Wilks para avaliar a significância das raízes canônicas conjuntamente. Apenas a primeira função canônica mostrou-se significativa e apresentou alto R² canônico (0,9141). A primeira função canônica permite verificar que: a) Quanto maior a profundidade de penetração do pino do Pilodyn menor a densidade básica, menores os teores de lignina e extrativos totais, menor o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior o teor de holocelulose. b) Há uma tendência de elevados teores de lignina e extrativos totais e menor teor de holocelulose estarem associados com a madeira de maior poder calorífico superior e maior densidade básica. c) O rendimento gravimétrico em carvão vegetal está relacionado negativamente com o teor de holocelulose e positivamente com os teores de lignina e extrativos totais e com a densidade básica da madeira. Estes resultados demonstram a possibilidade de utilização dessa técnica multivariada para realizar inferências a respeito da qualidade e produção do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*.

Palavras-chave: análise multivariada, bioenergia, biomassa, clones

Abstract

This study aimed at using the canonical correlation analysis to verify associations between the group formed by wood characteristics and the group formed by the characteristics of the charcoal obtained from *Eucalyptus* clones, focusing on the non-destructive method called Pylodin. Seven *Eucalyptus* clones and 24 sample observations were used. The multivariate Wilk's Lambda test was used to evaluate the significance of the canonical roots. Only the first canonical function was significant and presented high canonical R² (0.9141). The first canonical function shows that: a) The higher depth of penetration of the Pilodyn pin is associated with the lower basic density, lower lignin and total extractives content, lower gravimetric yield in charcoal and higher holocellulose content. b) There is a tendency of high lignin and total extractives contents and lower holocellulose contents being associated with wood of higher calorific value and basic density. c) Gravimetric yield in charcoal is negatively related with holocellulose content and positively with lignin and total extractives contents and basic density of the wood. These results show the possibility of using this multivariate technique to make inferences about the quality and production of charcoal from *Eucalyptus* clones.

Keywords: multivariate analysis, bioenergy, biomass, clones

INTRODUÇÃO

A área dos plantios de *Eucalyptus* no Brasil é de 4.754.334 hectares e continua em processo de expansão (ABRAF, 2011). O estado de Minas Gerais apresenta a maior área plantada (aproxima-

madamente 30% da área cultivada), destinada, principalmente, para atender a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico.

Nesse sentido, a produção e qualidade do carvão vegetal sofrem influência do sistema empregado e da matéria-prima utilizada. A quali-

¹Graduando em Engenharia Florestal – UFPA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras –MG - E-mail: depaulaprotasio@gmail.com

²Engenheiro Florestal, Pós-Doutor em Engenharia Florestal, Prof. Associado IV – UFPA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras –MG - E-mail: trugilho@dcf.ufpa.br

³Engenheiro Florestal, Mestrando em Ciência e Tecnologia da Madeira – UFPA - Universidade Federal de Lavras, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras – MG - E-mail: tmaffia@hotmail.com

⁴Saint Gobain PAM Bioenergia LTDA., Rua Corrêa Lacerda, 33, CEP 37310-000, Bom Jardim de Minas, MG.

dade e homogeneidade do carvão vegetal são desejáveis do ponto de vista industrial, uma vez que beneficiam a redução do minério de ferro.

Com relação à madeira, as características físicas e químicas são muito importantes na sua decomposição térmica e, conseqüentemente, produção do carvão vegetal. Dessa forma, tornam-se necessárias pesquisas que estabeleçam as relações entre as características da madeira com as do carvão vegetal dela originado. A determinação das propriedades da madeira pode ser obtida por meio de métodos destrutivos ou não destrutivos. As principais vantagens dos métodos não destrutivos referem-se à diminuição dos custos e do tempo das análises, sendo que a utilização desses métodos pode subsidiar a seleção e avaliação de clones de *Eucalyptus* para distintos usos (GOUVÊA *et al.*, 2011a; GOUVÊA *et al.*, 2011b; NEVES *et al.*, 2011), como a produção de carvão vegetal.

Várias são as técnicas não destrutivas disponíveis para a análise de madeira e, nos últimos anos, tem-se utilizado o equipamento denominado Pilodyn, que mede a profundidade de penetração de um pino de aço mantendo-se constante a pressão aplicada para realizar inferências a respeito da densidade básica da madeira (GOUVÊA *et al.*, 2011a; GOUVÊA *et al.*, 2011b; NEVES *et al.*, 2011; THIERSCH *et al.*, 2006; VALE *et al.*, 1995). Contudo, poucos são os trabalhos que relacionam os dados obtidos por meio desse equipamento com as outras características da madeira de *Eucalyptus* e do carvão vegetal dela obtido.

Diante disso, há a possibilidade de se utilizar a análise de correlação canônica para a determinação das interrelações existentes entre as características da madeira e do carvão vegetal com a penetração do pino do Pilodyn.

A análise de correlação canônica é um procedimento estatístico multivariado que permite verificar as correlações lineares existentes entre dois grupos ou conjuntos de variáveis (X e Y). Essa análise consiste na obtenção de um par de variáveis latentes, denominadas variáveis estatísticas canônicas, que sejam combinações lineares das variáveis dos dois vetores (X e Y) e que as informações contidas nos parâmetros estejam concentradas na correlação entre essas novas variáveis. Cada par de variáveis estatísticas canônicas é denominado de função canônica (FERREIRA, 2008; HAIR JUNIOR *et al.*, 2009; HAIR JUNIOR *et al.*, 2005; MINGOTI, 2005).

Nessa técnica de análise multivariada, o número máximo de funções canônicas que podem ser obtidas é igual ao número de variáveis do

menor conjunto de dados. O primeiro par de variáveis estatísticas canônicas é obtido de forma a apresentar a maior correlação possível com os grupos de variáveis. Pode-se obter um segundo par, não correlacionado com o primeiro, que contenha o máximo de informação remanescente que não tenha sido contemplada pela explicação do primeiro par de variáveis latentes e assim sucessivamente (FERREIRA, 2008; HAIR JUNIOR *et al.*, 2009; HAIR JUNIOR *et al.*, 2005; MINGOTI, 2005; FERREIRA, 2008).

Ao contrário da regressão múltipla que prevê uma única variável dependente a partir de um conjunto de variáveis independentes múltiplas, a correlação canônica simultaneamente prevê múltiplas variáveis dependentes a partir de múltiplas variáveis independentes (HAIR JUNIOR *et al.*, 2009).

Pelo exposto, o objetivo desse trabalho foi utilizar a análise de correlação canônica para verificar as associações existentes entre o grupo formado pelas características da madeira de clones de *Eucalyptus* com o grupo formado pelas características do carvão vegetal dela obtido, com enfoque para o método de avaliação não destrutivo denominado Pilodyn.

MATERIAL E MÉTODOS

Material biológico

Foram amostrados sete clones de *Eucalyptus* sp. da empresa Saint-Gobain PAM Bioenergia LTDA., localizada entre os municípios de Bom Jardim de Minas e Lima Duarte, ambos em Minas Gerais (Tabela 1).

A região de coleta apresenta temperatura média e precipitação anuais de 20,4 °C e 1250 mm, respectivamente. As árvores foram coletadas em quatro locais distintos, denominados de Fazenda Areão (21°51'S; 40°07'W), Fazenda Ponte (21°51'S; 44°10'W), Fazenda Brejos (21°46'S; 44°02'W) e Fazenda Aliança (21°45'S; 44°02'W). Em todos os locais o espaçamento de plantio foi de 3,5 m x 2,5 m. O solo da região é denominado de latossolo vermelho e cambissolo. Foi realizada a fosfatagem (450kg/ha) na subsolagem e a aplicação de 171 kg/ha de NPK 06-30-15 com 0,5% de B, 0,3% de Zn e 0,3% de Cu 10 à 20 dias após o transplantio das mudas. Além disso, foi aplicado 228 kg/ha de cloreto de potássio no primeiro e segundo anos do plantio.

Os clones I144 e I220 foram provenientes da empresa Acesita Energética, os clones 3334, 3335 e 3281, da empresa Plantar, e os clones 1277 e 0321, da empresa Copener Bahia.

Tabela 1. Relação dos clones utilizados.**Table 1.** List of clones used.

Fazenda	Clone	Idade (meses)	Tratamento
Aliança	0321	46	1
Aliança	1277	46	2
Aliança	0321	58	3
Aliança	1277	58	4
Areão	1144	57	5
Areão	1220	57	6
Areão	3281	57	7
Areão	3334	57	8
Areão	1144	69	9
Areão	1220	69	10
Areão	3281	69	11
Areão	3334	69	12
Brejos	1144	49	13
Brejos	1220	49	14
Brejos	1144	61	15
Brejos	1220	61	16
Ponte	1144	55	17
Ponte	1220	55	18
Ponte	3334	55	19
Ponte	3335	55	20
Ponte	1144	67	21
Ponte	1220	67	22
Ponte	3334	67	23
Ponte	3335	67	24

Foram amostradas quatro árvores por tratamento considerado. As árvores foram amostradas no campo de forma casual, sendo retirados discos de 2,5 cm de espessura a 2, 10, 30, 50 e 70% da sua altura comercial, considerada até um diâmetro mínimo de 5 cm com casca (DOWNES *et al.*, 1997), além de um disco extra a 1,30 m de altura do solo (DAP).

Os clones também foram avaliados de forma não destrutiva por meio do equipamento Pildyn que mede a profundidade de penetração de um pino de aço a pressão constante. Em cada indivíduo foram abertos painéis a 1,30 m do solo (DAP), sendo realizadas duas leituras na direção da linha de plantio e duas leituras na direção perpendicular à linha de plantio.

Análises energéticas, físicas e químicas da madeira

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas opostas passando pela medula. Na determinação da densidade básica da madeira foi utilizado um par das menores cunhas opostas, seguindo os preceitos da norma NBR 11941 (ABNT, 2003). A densidade básica média da árvore foi considerada como sendo a média aritmética dos pontos de amostragem longitudinal no tronco das árvores, sem considerar o DAP.

Para a determinação do poder calorífico superior, dos teores de lignina, extrativos totais e cinzas foram retiradas amostras nos discos provenientes de todas as posições longitudinais de amostragem visando à formação de uma amostra composta por árvore.

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi obtido de acordo com a metodologia proposta por Gomide e Demuner (1986) e o teor de lignina solúvel (Klason) em ácido sulfúrico foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi obtido pelo somatório dos teores de lignina solúvel e insolúvel.

Para a quantificação dos teores de cinzas e extrativos totais da madeira foram consideradas as metodologias estabelecidas pelas normas M11/77 e M3/69 (ABTCP, 1974a; ABTCP, 1974b), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido por diferença, conforme a Eq. 1:

$$HOLO = 100 - Lig - Ext - Cz \quad (1)$$

Em que: HOLO é o teor de holocelulose (%), Lig é o teor de lignina total (%), Ext é o teor de extrativos totais (%) e Cz é o teor de cinzas (%).

O poder calorífico superior foi determinado em um calorímetro digital, conforme a NBR 8633 (ABNT, 1984).

Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla). Foram utilizados em cada ensaio aproximadamente 500 g de madeira, ou seja, cunhas provenientes dos discos retirados das árvores. As amostras foram previamente secas em estufa a 103±2 °C, sendo selecionada uma árvore por tratamento. A temperatura inicial do ensaio foi de 100 °C e a temperatura final de 450 °C, considerando-se uma taxa de aquecimento de 1,67 °C/min. O forno elétrico permaneceu estabilizado a 450 °C por um período de 30 minutos. O tempo total de carbonização foi de 4 horas (TRUGILHO *et al.*, 1997a; TRUGILHO *et al.*, 1997b; TRUGILHO *et al.*, 2001; TRUGILHO *et al.*, 2005; BOTREL *et al.*, 2007; NEVES *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011b). Após as carbonizações foi avaliado o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água, conforme descrito na norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

Foi realizada a análise química imediata dos carvões produzidos visando à determinação dos teores de materiais voláteis, de cinza e, por diferença, de carbono fixo, conforme procedimento estabelecido na NBR 8112 (ABNT, 1983).

Para a determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal foi considerado o mesmo procedimento utilizado para a madeira.

Análise de correlação canônica

Foi realizada a análise de correlação canônica, considerando os dados originais observados, para verificar as associações existentes entre um primeiro grupo de características da madeira (lignina, extrativos totais, densidade básica, holocelulose, profundidade de penetração do pino do Pilodyn e poder calorífico superior) com um segundo grupo formado pelas características do carvão vegetal (densidade relativa aparente, rendimento gravimétrico, teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis e poder calorífico superior).

O primeiro grupo representa as variáveis independentes (X) e o segundo as dependentes (Y). Dessa forma, foi possível determinar 5 funções canônicas ou 5 pares de variáveis estatísticas canônicas. Foram estimadas as cargas canônicas, ou seja, as correlações entre as variáveis originais e suas respectivas variáveis estatísticas canônicas e as cargas canônicas cruzadas que representam a correlação entre uma variável original de um determinado grupo e a variável estatística canônica do outro grupo.

De forma preliminar à análise de correlação canônica, foram estimadas as correlações lineares simples entre as variáveis como forma de avaliar a existência de multicolinearidade entre elas.

Utilizou-se o teste multivariado de significância Lambda de Wilks (aproximação da distribuição F) para avaliar a significância das raízes canônicas conjuntamente. Além disso, utilizou-se o teste generalizado de Shapiro-Wilk para verificar a existência de normalidade multivariada dos dados utilizados, uma vez que o teste de significância da correlação canônica só tem validade quando os vetores X e Y são normais multivariados (FERREIRA, 2008; JOHNSON; WICHERN, 1992; MINGOTI, 2005).

A quantidade de variância explicada, ou seja, o percentual de variância na variável estatística canônica dependente que pode ser explicada pela variável estatística canônica independente, e vice-versa, foi determinada elevando-se ao quadrado a correlação canônica (R^2 canônico).

Já a quantidade de variância compartilhada

explicada entre as variáveis observadas dependentes e independentes e as suas respectivas variáveis estatísticas canônicas foi determinada elevando-se ao quadrado as cargas canônicas. O mesmo foi realizado para as cargas canônicas cruzadas com o intuito de estimar a variância compartilhada explicada entre a variável dependente ou independente observada com a variável estatística canônica oposta.

Determinou-se ainda o índice de redundância como sendo a carga canônica quadrada média vezes o R^2 canônico. O índice de redundância expressa a quantidade de variância em uma variável estatística canônica (dependente ou independente) explicada pela outra variável estatística canônica na função canônica. Para se obter um elevado índice de redundância, deve-se ter uma alta correlação canônica e um alto grau de variância compartilhada explicada pela variável estatística canônica. Deve-se considerar o índice de redundância para superar o viés e a incerteza inerentes ao uso de raízes canônicas (correlações canônicas ao quadrado) como uma medida de variância compartilhada (HAIR JUNIOR *et al.*, 2009).

Os procedimentos utilizados para as análises estatísticas foram baseados nos trabalhos de diversos autores (FERREIRA, 2008; HAIR JUNIOR *et al.*, 2009; HAIR JUNIOR. *et al.*, 2005; MINGOTI, 2005; TRUGILHO *et al.*, 1997b; TRUGILHO *et al.*, 2003).

Todas as análises foram realizadas utilizando-se o software estatístico R versão 2.11.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008), pacotes CCA (GONZÁLEZ; DÉJEAN, 2009), CCP (MENZEL, 2009) e yacca (BUTTS, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontram-se as correlações canônicas obtidas, o R^2 canônico e o teste de significância realizado.

Observa-se que apenas a função canônica 1 mostrou-se significativa. O R^2 canônico encontrado foi elevado, ou seja, a quantidade de variância explicada (91,41%) entre as variáveis estatísticas canônicas independente e dependente da função 1 foi expressiva para os grupos de características analisadas. Isto é um indicativo da influência das características da madeira e do método de avaliação não destrutivo utilizado na qualidade e produção do carvão vegetal de *Eucalyptus*.

Na Figura 1 encontra-se os escores da variáveis estatísticas canônicas da função canônica 1.

Tabela 2. Teste multivariado Lambda de Wilks (aproximação da distribuição F).

Table 2. Multivariate test of Wilks' Lambda (approximation of the F distribution).

Função canônica	Correlação canônica	R ² canônico	Fa	GL ₁	GL ₂	p-valor
1	0,9561	0,9141	3,06	30	54	0,00017
2	0,7888	0,6222	1,37	20	47	0,18276
3	0,5386	0,2901	0,76	12	40	0,68567
4	0,4135	0,1710	0,56	6	32	0,75527
5	0,1167	0,0136	0,12	2	17	0,88997

Fa: estatística F aproximada; GL₁: graus de liberdade referente aos tratamentos; GL₂: graus de liberdade referente ao erro.

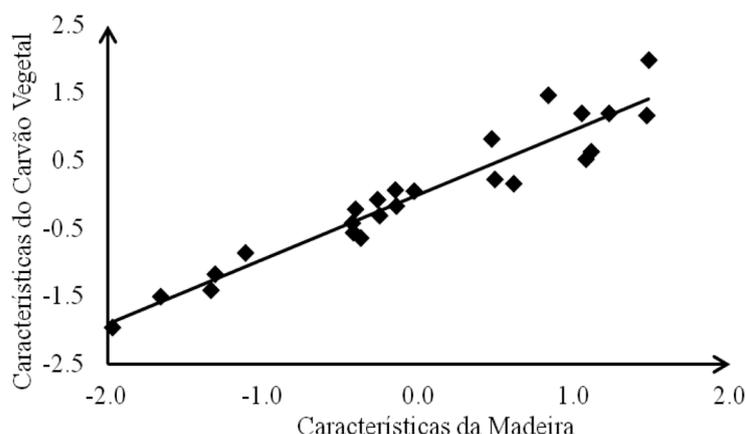


Figura 1. Escores padronizados das variáveis estatísticas canônicas.

Figure 1. Standardized scores of the canonical statistical variables.

Na Tabela 3 encontram-se as cargas canônicas e as cargas canônicas cruzadas para a função canônica 1. Quanto maior a carga canônica, mais importante é a variável para derivar a variável estatística canônica (HAIR JUNIOR *et al.*, 2005).

Analisando as cargas canônicas para a variável canônica relativa às características do carvão vegetal observa-se que o rendimento gravimétrico, o teor de materiais voláteis e a densidade relativa aparente apresentaram (em módulo) valores mais elevados. Já para o grupo de características da madeira, apenas o poder calorífico superior apresentou baixa carga canônica.

Os resultados encontrados evidenciam que o rendimento gravimétrico está correlacionado positivamente com o teor de materiais voláteis e negativamente com o teor de carbono fixo e a densidade relativa aparente do carvão vegetal de *Eucalyptus*. Contudo, a carga canônica referente ao teor de carbono fixo foi baixa.

Resultado semelhante foi encontrado por Vale *et al.* (2001) e Protásio *et al.* (2011b) por meio da análise de correlação linear simples. Os autores observaram uma tendência de diminuição no teor de carbono fixo e aumento no teor de materiais voláteis com o aumento no rendimento em carvão vegetal para espécies do bioma cerrado. Já a correlação entre o rendimento gravimétrico e a densidade relativa aparente, encontrada por Vale *et al.* (2001), foi não significativa estatisticamente, diferindo assim da tendência observada nesse estudo.

Tabela 3. Cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas para a função canônica 1.

Table 3. Canonical loads and crossed canonical loads for the canonical function 1.

Variáveis	Cargas canônicas	Cargas canônicas Cruzadas
Carvão Vegetal		
Rendimento gravimétrico	0,63381	0,60600
Materiais voláteis	0,14212	0,13589
Carbono Fixo	-0,01666	-0,01593
Poder calorífico superior	0,00348	0,00333
Densidade relativa aparente	-0,22951	-0,21944
Madeira		
Penetração do Pilodyn	-0,38519	-0,36829
Lignina total	0,57992	0,55447
Densidade básica	0,38793	0,37091
Poder calorífico superior	0,24912	0,23819
Extrativos totais	0,50129	0,47930
Holocelulose	-0,61476	-0,58779

As relações entre o teor de carbono fixo (TCF) e o poder calorífico superior (PCS), bem como entre o PCS e o rendimento em carvão vegetal não foram suficientemente explicadas pela análise de correlação canônica devido aos menores valores observados para as cargas canônicas referentes ao PCS e ao TCF.

Quanto às cargas canônicas do grupo formado pelas características avaliadas na madeira pode-se observar que a profundidade de penetração do pino do Pilodyn está correlacionada negativamente com a densidade básica, com os

teores de lignina e de extrativos totais e com o poder calorífico superior e positivamente com o teor de holocelulose. Há relatos na literatura de correlações lineares negativas entre a profundidade de penetração do pino do Pilodyn e a densidade básica (NEVES *et al.*, 2011; ROSADO *et al.*, 1983; THIERSCH *et al.*, 2006; VALE *et al.*, 1995), corroborando com o encontrado neste trabalho.

Observa-se ainda que as cargas canônicas referentes aos teores de lignina e extrativos totais, ao poder calorífico superior da madeira e à densidade básica apresentaram os mesmos sinais. Esse resultado é um indicativo de que quanto maiores os teores de lignina e extrativos totais, maior o poder calorífico superior e a densidade básica da madeira. Contudo, há uma tendência de decréscimo do poder calorífico superior, dos teores de lignina e extrativos totais e da densidade básica da madeira com o acréscimo do teor de holocelulose.

Trugilho *et al.* (2003), estudando a análise de correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus*, observaram uma associação entre a madeira de alto teor de extrativos totais com a madeira de baixa densidade básica, diferindo do observado neste trabalho.

Vale *et al.* (2010) encontraram correlação linear simples positiva entre a densidade básica e o teor de lignina e negativa com os teores de extrativos totais e holocelulose para várias espécies do bioma Cerrado. Os autores encontraram ainda relação negativa entre os teores de lignina e extrativos totais, o que pode ser atribuído às características das espécies utilizadas.

O poder calorífico superior da madeira é dependente da composição química molecular (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos) e elementar (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre) da biomassa avaliada (HUANG *et al.*, 2009; PROTÁSIO *et al.*, 2011a; SHAFIZADEH). A lignina e os extrativos apresentam baixo grau de oxidação e alto calor de combustão em comparação com a celulose e as hemiceluloses (KUMAR *et al.*, 1992), justificando assim a sua influência no valor calórico da biomassa vegetal.

Analisando-se as cargas canônicas cruzadas, observa-se que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal está relacionado negativamente com a profundidade de penetração do pino do Pilodyn e com o teor de holocelulose e positivamente com os teores de lignina e extrativos totais e com a densidade básica da madeira.

Trugilho *et al.* (1997b), utilizando a análise de correlação canônica para identificar índices de qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal, mencionaram que as madeiras que apresentam elevada densidade básica, baixo teor de cinza, elevado teor de lignina e que possuam fibras de parede celular mais espessa e de menor largura são responsáveis pela qualidade e rendimento do carvão vegetal, assemelhando-se ao que foi obtido no presente trabalho.

Vale *et al.* (2010) não encontraram correlações simples significativas entre os teores de lignina, extrativos totais e holocelulose e a densidade básica com o rendimento gravimétrico em carvão, diferindo do observado neste trabalho. Isso ocorreu provavelmente devido ao tipo de lignina, especialmente a relação siringil/guaiacil (S/G). Já Brito e Barrichelo (1977) observaram tendência de acréscimo no rendimento gravimétrico com o acréscimo do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus*.

Vale *et al.* (2001) observaram correlação linear simples não significativa entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e a densidade básica, diferindo do observado neste trabalho. De forma semelhante, Brito e Barrichelo (1977) não encontraram correlação linear entre a densidade básica e o rendimento em carvão vegetal. Possivelmente, o tipo de análise estatística utilizada, bem como a matéria-prima estejam influenciando esses resultados.

A quantificação e análise do teor de lignina na madeira é fundamental para a avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de bioenergia, devido à relação positiva e linear existente entre essa variável e o poder calorífico (DEMIRBAS, 2001). Além disso, a lignina é um elemento químico complexo e mais estável termicamente, sendo importante para maximizar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Trugilho *et al.* (2001) encontraram relação linear positiva entre a estimativa de massa seca de lignina e a estimativa de massa seca do carvão de *Eucalyptus*, evidenciando a importância dessa variável no processo de pirólise.

Segundo Shafizadeh (1985), as hemiceluloses são degradadas entre as temperaturas de 225 a 325 °C, a celulose entre 305 a 375 °C e a lignina apresenta decomposição térmica entre 250 a 500 °C. Nesse sentido, teores mais elevados de holocelulose não são ideais quando a madeira é destinada para a produção de bioenergia por meio da combustão direta em caldeiras, gaseificadores ou termelétricas, ou para a produção de carvão.

O teor de materiais voláteis do carvão vegetal apresentou correlação negativa com o teor de holocelulose e positiva com os teores de lignina e extrativos totais e a densidade básica, sendo observado um efeito contrário para o teor de carbono fixo. Contudo, observou-se baixas cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas referentes aos teores de carbono fixo e materiais voláteis, ou seja, as relações entre essas características do carvão vegetal e as variáveis estatísticas canônicas não apresentaram resultado expressivo e satisfatório.

Quanto ao poder calorífico superior do carvão vegetal, observou-se relação negativa dessa variável com o teor de holocelulose e positiva com o poder calorífico superior da madeira e os teores de lignina e extrativos totais. Entretanto, a baixa magnitude das cargas canônicas dessa variável energética dificultam a validação desses resultados.

As relações existentes entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal com as demais variáveis não foram suficientemente explicadas pela análise de correlação canônica.

Na Tabela 4 encontra-se o cálculo realizado para obter-se o índice de redundância para a primeira função canônica.

A quantidade de variância compartilhada explicada pela variável estatística canônica dependente foi, em média de, 9,5%. Observa-se que o rendimento gravimétrico apresentou o maior percentual de variância explicada pela variável estatística canônica dependente, ou seja, 40,17%. Dessa forma, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pode ser considerado a variável mais relevante na variável estatística canônica dependente.

Analisando-se a variável estatística canônica independente, pode-se observar que os teores de lignina, de extrativos totais e de holocelulose apresentaram os maiores percentuais de variância explicada pela variável estatística canônica. Nota-se ainda que, em média, a quantidade de variância compartilhada explicada pela variável estatística canônica independente foi de 22,11%.

Quanto às cargas canônicas cruzadas ao quadrado, observa-se que aproximadamente 37% da variância do rendimento gravimétrico em carvão vegetal podem ser explicados pela variável estatística canônica independente (formada pelas características da madeira). Esse resultado reforça a importância da composição química e física da madeira no rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Além disso, foi possível observar o potencial de utilização do equipamento Pilodyn para realizar inferências a respeito dessa característica quantitativa do carvão vegetal.

Para as características avaliadas na madeira observa-se que aproximadamente 15% da variância da profundidade de penetração do pino do Pilodyn e da densidade básica foram explicadas pela variável estatística canônica independente. O maior percentual de variância explicada por essa variável estatística canônica foi de 34, 25 e 38% para os teores de lignina, extrativos totais e holocelulose, respectivamente.

Segundo Hair Junior *et al.* (2009), nenhuma orientação generalizada foi estabelecida sobre o índice de redundância mínimo aceitável, sendo que na avaliação das funções canônicas, o pesquisador deve julgar a sua significância teórica e prática perante a pesquisa realizada.

Tabela 4. Cálculo do índice de redundância para a primeira função canônica.

Table 4. Calculation of the redundancy index for the first canonical function.

Variáveis	Carga canônica quadrada	Carga canônica cruzada quadrada	Índice de redundância (%)
Carvão Vegetal			
Rendimento gravimétrico	0,40172	0,36724	8,68
Materiais voláteis	0,02020	0,01847	
Carbono Fixo	0,00028	0,00025	
Poder calorífico superior	0,00001	0,00001	
Densidade relativa aparente	0,05267	0,04815	
Média	0,09498	0,08682	
Madeira			
Penetração do Pilodyn	0,14837	0,13564	20,21
Lignina total	0,33631	0,30744	
Densidade básica	0,15049	0,13757	
Poder calorífico superior	0,06206	0,05673	
Extrativos totais	0,25129	0,22973	
Holocelulose	0,37793	0,34550	
Média	0,22108	0,20210	

Quanto aos índices de redundância encontrados, observa-se que apenas 8,68% da variância nas variáveis dependentes (características do carvão vegetal) foram explicados pela variável estatística canônica independente (formada pelas características avaliadas na madeira). Já a variável estatística canônica dependente explicou 20,21% da variância das variáveis independentes. Isso ocorreu devido às baixas cargas canônicas encontradas para o poder calorífico superior da madeira e do carvão e para os teores de carbono fixo e materiais voláteis.

CONCLUSÕES

Quanto maior a profundidade de penetração do pino do Pilodyn, menor a densidade básica, menores os teores de lignina e extrativos totais, menor o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior o teor de holocelulose.

Há uma tendência de elevados teores de lignina e extrativos totais e menor teor de holocelulose estarem associados com a madeira de maiores valores de poder calorífico superior e densidade básica.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal está relacionado negativamente com o teor de holocelulose e positivamente com os teores de lignina e extrativos totais e com a densidade básica da madeira.

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de utilização dessa técnica de análise multivariada para realizar inferências a respeito da qualidade e produção do carvão de *Eucalyptus*.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Fapemig, Capes e CNPq pelo apoio financeiro e à Saint-Gobain PAM Bioenergia LTDA. pela doação do material biológico utilizado.

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.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: Análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro, RJ, 1983. 6p.

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

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

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

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; SILVA, J.R.M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, Viçosa, v.31, n.3, p.391-398, 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*, Piracicaba, n.14, p.9-20, 1977.

BUTTS, C.T. *Yet Another Canonical Correlation Analysis Package*. R package version 2.11.0. 2009. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org>>. Acesso em: 24 nov. 2010.

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*, Oxford, v.42, n.2, p.183-188, 2001.

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*. Clayton South: CSIRO, 1997. 126p.

FERREIRA, D.F. *Estatística Multivariada*. Lavras: UFLA, 2008. 662p.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. *Lignins: occurrence, formation, structure and reactions*. 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.
- GONZÁLEZ, I. ; DÉJEAN, S.T. **Canonical Correlation Analysis**. R package version 2.11.1. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org>>. Acesso em: 24 nov. 2010.
- GOUVÊA, A.F.G.; TRUGILHO, P.F.; COLODETTE, J.L.; BIANCHI, M L.; SORAGI, L.C.; OLIVEIRA, A. C. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n. 90, p. 205-220, 2011a.
- GOUVÊA, A.F.G.; TRUGILHO, P.F.; GOMIDE, J.L.; SILVA, J.R.M.; ANDRADE, C.R.; ALVES, I.C.N. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.3, n.2, p.349–358, 2011b.
- HAIR JUNIOR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593p.
- 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**, Oxford, n.29, p.1793–1797, 2009.
- JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1992. 607p.
- KUMAR, M.; GUPTA, R.C.; SHARMA, T. Effect of carbonization conditions on the yield and chemical composition of Acacia and *Eucalyptus* wood chars. **Biomass and Bioenergy**, v.3, p.41–417, 1992.
- MENZEL, U. **Significance Tests for Canonical Correlation Analysis (CCA)**. R package version 2.11.0. 2009. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org>>. Acesso em: 24 nov. 2010.
- MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 297p.
- 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.
- 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, 2011a.
- PROTÁSIO, T.P.; SANTANA, J.D.P.; GUIMARÃES NETO, R.M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P.F.; BISPO, I.B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.68, p.295-307, 2011b.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 dez. 2010.
- ROSADO, S.C.S.; BRUNE, A.; OLIVEIRA, L.M. Avaliação da densidade básica da madeira de árvores em pé. **Revista Árvore**, Viçosa, v.2, n.2, p.147- 153, 1983.
- 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. Cap. 6, p.183–217.
- SHAFIZADEH, F. Basic principles of direct combustion. In: SOFER S. S., ZABROSKY O.R. (Ed.). **Biomass conversion process for energy and fuels**. New York: Plenum Press, 1981. p.103-112.
- THIERSCH, C.R.; SCOLFORO, J.R.; OLIVEIRA, A.D.; REZENDE, G.D.S.P.; MAESTRI, R. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v.12, n. 3, p.264-278, 2006.
- 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 urophylla*. **Cerne**, Lavras, v.9, n.1, p.066-080, 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.; SILVA, J.R.M.; MORI, F.A.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M.; MENDES, L.F B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. *Cerne*, Lavras, v.11, n.2, p.178-186, 2005.

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, 1997a.

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, 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. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.20, n.1, p.137-145, 2010.

VALE, A.T.; MOURA, V.P.G.; MARTINS, I.S.; REZENDE, D.C.A. Densidade básica média, em função da profundidade de penetração do pino do "Pilodyn" e da classe diamétrica, e da variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Revista Árvore*, Viçosa, v.19, n.1, p.80-91, 1995.

Recebido em 12/09/2011
Aceito para publicação em 11/06/2012