

Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal

Thiago Andrade Neves¹, Thiago de Paula Protásio¹, Allan Motta Couto¹, Paulo Fernando Trugilho¹, Vinícius Oliveira Silva¹, Carlos Magno Melo Vieira²

¹Universidade Federal de Lavras (UFLA), Departamento de Ciências Florestais, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil

²Saint-Gobain Canalizações LTDA, Rua Corrêa Lacerda, 33, CEP 37310-000, Bom Jardim de Minas, MG, Brasil

*Autor correspondente:
depaulaprotasio@gmail.com

Termos para indexação:

Bioenergia
Biomassa
Qualidade da madeira

Index terms:

Bioenergy
Biomass
Wood quality

Histórico do artigo:

Recebido em 12 mai 2011
Aprovado em 23 nov 2011
Publicado em 28 dez 2011

doi: 10.4336/2011.pfb.31.68.319

Resumo - Os objetivos desse trabalho foram avaliar a qualidade da madeira e do carvão vegetal de três clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais e verificar a relação funcional existente entre a densidade básica e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*. Foram avaliados três clones de *Eucalyptus* e amostradas quatro árvores por clone em cada local. Determinou-se a profundidade de penetração de um pino de aço do *Pilodyn* a 1,30 m de altura do solo (DAP), a densidade básica média (DBm), a densidade básica no DAP, o poder calorífico superior e os teores de lignina, extrativos totais, cinzas, holocelulose e a análise química elementar (C, H, N e O). A madeira foi carbonizada e o carvão produzido foi avaliado quantitativamente e qualitativamente. Na avaliação das características da madeira, utilizou-se um DIC em um esquema fatorial 3 x 2. Foi ajustado um modelo linear entre a DBm e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*. Foi possível concluir que os clones apresentaram potencial para o uso energético. O carvão vegetal produzido pode ser utilizado na siderurgia. O modelo linear ajustado entre a DBm e a penetração do pino do *Pilodyn* mostrou-se satisfatório.

Evaluation of *Eucalyptus* clones in different places seeking to the production of vegetal charcoal

Abstract - This research aim to evaluate the wood and charcoal quality of three *Eucalyptus* clones planted at different places and to verify the existent functional relations between the basic density and the depth of penetration of the *Pilodyn* pin. Three *Eucalyptus* clones were evaluated and four trees were sample for each clone and place. It was determined the depth of penetration of a *Pilodyn* pin at 1.30 m of height of the soil (DBH), average basic density (DBm), the basic density at DBH, the calorific value, lignin, total extractive, ashes and holocellulose contents and elemental chemical analysis (C, H, N and O). The wood was carbonized and the charcoal produced was evaluated quantitatively and qualitatively. In the evaluation of the wood characteristics a completely randomized design disposed in a factorial scheme 3 x 2 was used. A linear model was adjusted between DBm and the depth of penetration of the *Pilodyn* pin. It was possible to conclude that the clones present potential to be used for energy. The charcoal produced may be used in siderurgy. The linear model adjusted between DBm and the penetration of the *Pilodyn* pin was satisfactory.

Introdução

A madeira é um material muito heterogêneo, considerando-se as características anatômicas e químicas e as propriedades físicas e mecânicas. Essa heterogeneidade está relacionada com as variações nos sentidos radial, longitudinal e tangencial que a madeira normalmente apresenta. Apesar de dificultar a utilização, essa variabilidade permite que se encontrem diferentes materiais para atender a distintos usos.

Segundo Brito et al. (1983), o *Eucalyptus* é um importante gênero fornecedor de matéria-prima para diversas finalidades industriais. Esse fato está diretamente relacionado à grande variabilidade da qualidade da madeira das diversas espécies/clones desse gênero. Várias de suas espécies se adaptaram muito bem às condições edafoclimáticas do Brasil e passaram a ser importantes fornecedoras de matérias-primas para a produção de lenha, carvão vegetal, celulose e papel.

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, cerca de 35,4% de toda madeira produzida é destinada à produção de lenha, carvão vegetal e outros produtos florestais. Os principais consumidores de carvão vegetal são os setores de aço, ferro-gusa e ferros-liga e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial. O Estado de Minas Gerais se destaca como maior produtor e consumidor, pois possui o maior parque siderúrgico a carvão vegetal e a maior área plantada com eucalipto no Brasil (Anuário..., 2011).

O carvão vegetal apresenta ainda inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral. É renovável, menos poluente (tem baixo teor de cinzas), praticamente isento de enxofre/fósforo e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (Anuário..., 2011).

A produção e qualidade do carvão vegetal, por sua vez, são influenciadas pela madeira e pelo sistema adotado na transformação. Característica como o incremento volumétrico da árvore pode influenciar significativamente tal produção, uma vez que afeta diretamente a quantidade de massa seca produzida pelo indivíduo. Além disso, a composição química, principalmente o alto teor de lignina, aliada à elevada densidade básica da madeira, contribuem de forma positiva para o rendimento em carvão vegetal (Trugilho et al., 1997).

Dessa forma, as estimativas de biomassa seca e de lignina são fatores de fundamental importância quando a madeira é destinada para a produção de bioenergia (Lima et al. 2011; Trugilho et al., 2001; Trugilho et al., 1997; Oliveira et al., 1991). Além disso, os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e cinzas podem ser fundamentais para a avaliação de combustíveis de biomassa, pois esses constituintes elementares podem ser considerados como um índice de desempenho energético (Protásio et al., 2011).

O potencial energético da madeira sofre influência de diversos fatores, tais como a espécie/clone, idade, local de plantio e interações, podendo afetar de forma considerável a qualidade do carvão vegetal. Segundo Trugilho et al. (1997), as madeiras que apresentam alta densidade básica, baixo teor de cinzas, alto 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. Essas características podem ser consideradas como índices de qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal (Trugilho et al., 1997).

Contudo, segundo Botrel et al. (2007), poucos são os trabalhos disponíveis que tratam da seleção de material genético superior para a produção de carvão vegetal. Os autores ainda afirmaram que estudos que consideram o desempenho do produto também são muito importantes, já que o aprimoramento da matéria-prima, em conjunto com o produto obtido, proporcionará respostas mais efetivas.

Nesse contexto, na avaliação das características da madeira, pode-se optar por utilizar métodos não destrutivos. O uso de técnicas não destrutivas tem aumentado grandemente nos últimos anos e com resultados satisfatórios. Por exemplo, a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* para se fazer inferência a respeito da densidade básica (Gouvêa et al., 2011; Thiersc et al., 2006; Vale et al., 1995; Rosado et al., 1983), fornecendo assim subsídios para a seleção e avaliação preliminar de grande número de clones de eucalipto para a produção energética em condição de campo.

Portanto, os objetivos desse trabalho foram avaliar a qualidade da madeira e do carvão vegetal de três clones de *Eucalyptus* em diferentes locais e ajustar um modelo estatístico linear entre a densidade básica e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*.

Material e métodos

Material biológico e amostragem efetuada

Foram utilizados três clones de *Eucalyptus* da empresa Saint-Gobain Canalização, localizada no Município de Bom Jardim de Minas, Minas Gerais. Os clones I144 e I220 foram desenvolvidos pela empresa Acesita Energética, e o clone 3334 pela empresa Plantar. A região de coleta apresenta temperatura média anual de 20,4 °C e precipitação anual de 1.250 mm. As árvores com idade de aproximadamente 68 meses e espaçamento de plantio de 3,5 m x 2,5 m foram coletadas em dois locais distintos, denominados de fazenda Areão (21°51'S; 40°07'W) e fazenda Ponte (21°51'S; 44°10'W).

Foram amostradas quatro árvores por clone em cada local de plantio. 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 através do equipamento *Pilodyn* que mede a profundidade de penetração de um pino de aço à 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 químicas, físicas e energéticas 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 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). A densidade básica média da árvore (DBm) 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 (PCS), dos teores de lignina, extrativos totais, cinzas e dos componentes químicos elementares (C, H, N e O) 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 & Demuner (1986), e o teor de lignina solúvel (Klason) em ácido sulfúrico 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 previstas nas normas M11/77 e M3/69 (Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 1974a; 1974b), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido por diferença, conforme a Equação 1:

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - \text{Lig (\%)} - \text{Ext (\%)} - \text{Cz (\%)} \quad (1)$$

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

Para a análise química elementar, as amostras compostas foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 60 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio em relação à massa seca da madeira foi realizada em um analisador universal da marca Elementar, conforme Paula et al. (2011) e Protásio et al. (2011). As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200 °C.

O poder calorífico superior foi determinado em um calorímetro digital adiabático, conforme a NBR 8633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 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 clone. 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⁻¹. O forno elétrico permaneceu estabilizado a 450 °C por 30 minutos (Botrel et al., 2007; Trugilho et al., 2001; Trugilho et al., 2005).

Após as carbonizações, foram avaliados os rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso condensado e, por diferença, em gases não condensáveis.

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água, conforme descrito por Vital (1984).

Foi realizada a análise química imediata nos carvões produzidos visando à determinação dos teores materiais voláteis, cinzas e, por diferença, de carbono fixo,

conforme procedimento estabelecido na NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983).

Análises estatísticas

Na avaliação das características quantificadas na madeira, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado disposto em um esquema fatorial 3 x 2, considerando-se como níveis dos fatores os diferentes clones e os locais de cultivo e quatro repetições, conforme modelo estatístico apresentado na Equação 2. Utilizou-se o Teste de Tukey a 5% de significância para comparação múltipla das médias.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

Em que: Y_{ijk} é o efeito do i -ésimo nível do fator clone ($i = 1, 2$ e 3), no j -ésimo nível do fator local de cultivo ($j = 1$ e 2) na k -ésima repetição ($k = 1, 2, 3$ e 4); μ é uma constante inerente a todas as observações; τ_i é o efeito do i -ésimo nível do fator clone ($i = 1, 2$ e 3), efeito fixo; β_j é o efeito do j -ésimo nível do fator local de cultivo ($j = 1$ e 2), efeito fixo; $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre τ_i e β_j , efeito aleatório, e ε_{ijk} é o erro experimental associado à observação Y_{ijk} , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância σ^2 .

Foi ajustado um modelo linear simples entre a densidade básica média da árvore e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* (Pil). O modelo ajustado foi avaliado com base na significância de todos os seus

coeficientes, no coeficiente de determinação (R^2), no erro padrão da estimativa (S_{xy}), na normalidade (Teste Shapiro Wilk), presença de variâncias desiguais, ou seja, heterocedasticidade (Teste Goldfeld-Quandt) e ausência de autocorrelação (Teste Durbin-Watson) dos resíduos. Além disso, foi verificada a correlação linear de Pearson entre as variáveis do modelo.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software R 2.11.0 (R Development Core Team, 2008).

Resultados e discussão

Características avaliadas na madeira

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises de variância para algumas características avaliadas na madeira dos clones. Verifica-se que o efeito da interação local x clone foi significativo para todas as características. Efeito significativo da interação indica a existência de dependência entre os fatores clone e local. Dessa forma, optou-se em fazer o seu desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro de local e vice versa. Observa-se que, de maneira geral, foram encontrados baixos coeficientes de variação experimental, o que indica a elevada precisão das análises de variância dos ensaios realizados (Pimentel-Gomes, 2009).

Na Tabela 2 encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de clone dentro de local e vice versa, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado para algumas características avaliadas na madeira.

Tabela 1. Resumo das análises de variância realizadas para algumas variáveis mensuradas na madeira dos clones de *Eucalyptus*.

| FV | GL | Quadrado Médio | | | | | | |
|-------------|-----|----------------|-------------------|---------|---------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | | Pil | DB _{DAP} | DBm | Ext | Lig | Cz | Holo |
| Local | 1 | 4,7082* | 0,0041* | 0,0049* | 4,5588* | 4,7437 ^{ns} | 0,0012 ^{ns} | 0,0048 ^{ns} |
| Clone | 2 | 4,7501* | 0,0050* | 0,0048* | 1,2751* | 0,483717 ^{ns} | 0,0090* | 0,8186 ^{ns} |
| Local*Clone | 2 | 8,0160* | 0,0019* | 0,0015* | 2,9066* | 10,7492* | 0,0124* | 18,2691* |
| Erro | 18 | 0,2512 | 0,0002 | 0,0004 | 0,1394 | 2,0704 | 0,0010 | 2,5614 |
| | CVe | 3,53 | 2,93 | 4,23 | 11,38 | 4,84 | 17,16 | 2,4 |

FV: fator de variação; GL: grau de liberdade; CVe: coeficiente de variação experimental (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica no DAP; DBm: densidade básica média; Ext: teor de extrativos totais; Lig: lignina total; Cz: teor de cinzas; Holo: teor de holocelulose ; *: significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns}: não significativo a 5% pelo Teste F.

Tabela 2. Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para algumas características avaliadas na madeira.

| Variáveis | Locais | Clones | | |
|-------------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| | | 3334 | I220 | I144 |
| Pil | Areão | 15,06 bB | 12,91 aA | 13,25 aA |
| | Ponte | 14,00 aA | 13,69 aA | 16,88 bB |
| DB _{DAP} | Areão | 0,454 aA | 0,504 bB | 0,466 aA |
| | Ponte | 0,461 aA | 0,473 aA | 0,412 bB |
| DBm | Areão | 0,455 aA | 0,506 bA | 0,476 abB |
| | Ponte | 0,454 abA | 0,479 bA | 0,419 aA |
| Ext | Areão | 1,89 aA | 2,87 bA | 3,77 cA |
| | Ponte | 4,12 bB | 3,31 aA | 3,71 abA |
| Lig | Areão | 29,80 aA | 29,50 aA | 31,31 aB |
| | Ponte | 29,50 abB | 30,58 bA | 27,86 aA |
| Cz | Areão | 0,25 bB | 0,18 abA | 0,15 aA |
| | Ponte | 0,15 abA | 0,25 bB | 0,15 aA |
| Holo | Areão | 66,21 bA | 67,45 abA | 64,77 aA |
| | Ponte | 68,06 aA | 65,86 aA | 68,28 abB |

Pil: penetração do pino do *Pilodyn* (mm); DB_{DAP}: densidade básica no DAP (g cm⁻³); DBm: densidade básica média (g cm⁻³); Ext: teor de extrativos totais (%); Lig: lignina total (%); Cz: teor de cinzas (%); Holo: teor de holocelulose (%). Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Para a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* (Pil), verifica-se que o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro de local mostrou que na fazenda Areão os clones I220 e I144 apresentaram os menores valores, enquanto que o clone 3334 apresentou o maior valor e estatisticamente diferente dos demais. Resultado diferente foi observado na fazenda Ponte, onde a madeira do clone I144 apresentou o maior valor médio, sendo estatisticamente diferente dos demais clones. O desdobramento e avaliação do efeito de local dentro de clone mostrou que somente o clone I220 não apresentou diferença entre as fazendas Areão e Ponte para essa característica. Esses resultados possivelmente estão associados aos valores de densidade básica da madeira dos clones nas localidades, uma vez que há relatos na literatura (Thiersc et al., 2006; Vale et al., 1995; Rosado et al., 1983) da existência de correlação linear negativa entre essas variáveis, ou seja, quanto maior a densidade básica, menor a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* e maior a resistência mecânica da madeira. Vale et al. (1995) encontraram valores de penetração do pino do *Pilodyn* variando de 10 mm a 15 mm para *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade, corroborando com o encontrado no presente trabalho.

Para a densidade básica da madeira, observa-se que os resultados foram bem semelhantes para as densidades básicas média (DBm) e a obtida na altura do DAP (DB_{DAP}), em que o clone I220 apresentou o maior valor nos dois locais avaliados. O clone 3334 não apresentou diferença entre locais para a DB_{DAP} e DBm, enquanto que o clone I220 apresentou o mesmo efeito para a DBm. Vale et al. (1995) encontraram valores de densidade básica média variando de 0,504 a 0,521 g cm⁻³ para *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade, assemelhando-se ao encontrado no presente trabalho.

Quanto à produção de carvão vegetal, é desejável que a madeira apresente elevada densidade básica, pois quanto maior a densidade da madeira, maior será a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume e maior a densidade aparente do carvão. Silva (2001) mencionou que para a produção de carvão vegetal utilizando-se madeira de *Eucalyptus*, é desejável que a densidade básica esteja entre 0,4 a 1,2 g cm⁻³. No entanto, é necessário mencionar que a densidade básica não é um parâmetro único de avaliação da potencialidade energética de clones de *Eucalyptus*. Deve-se considerar, também, a produtividade de massa seca, pois essa se relaciona diretamente com a produtividade de carvão vegetal (Lima et al., 2011; Trugilho et al., 2001).

Dentro desse contexto, o clone I220, fazendas Areão e Ponte, com a maior DBm, destacou-se como potencial para a produção de carvão vegetal devido aos elevados valores dessa característica em relação aos clones avaliados nos dois locais. O clone I144, somente na fazenda Areão, pode ser considerado para essa finalidade. Contudo, a baixa variação da densidade básica da madeira dos clones nos dois locais de cultivo não compromete de forma substancial a densidade energética e a utilização da biomassa avaliada como fonte de bioenergia.

Quanto ao teor de extrativos totais (Ext), observou-se o efeito de clone para as duas localidades consideradas. Na fazenda Areão, o clone 3334 apresentou estatisticamente o menor teor de extrativos totais, sendo o contrário encontrado para a fazenda Ponte. Os clones I220 e I144 não apresentaram diferença significativa entre os teores de extrativos nos dois locais avaliados. Segundo Santos (2010), dependendo da resistência à degradação térmica dos extrativos presentes na madeira, a sua maior porcentagem poderá colaborar para o aumento no poder calorífico do carvão, além de elevar o rendimento em carbono fixo, devido ao maior teor de carbono dos

seus componentes químicos. Silvério et al. (2006) encontraram teores de extrativos totais para diferentes clones e espécies de *Eucalyptus* próximos ao encontrado no presente trabalho. Diferentemente, Wehr (1991), estudando as alterações nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* em diversas idades, encontrou teores médios de extrativos totais variando de 4,1% a 8,5%.

O teor de lignina total (Lig) na madeira não apresentou efeito significativo de clone dentro da fazenda Areão, porém na fazenda Ponte esse efeito foi significativo. O clone I220, na fazenda Ponte, obteve o maior valor. Este mesmo clone não apresentou efeito significativo de local. Para os demais clones foi observado efeito significativo de local.

A quantificação e análise do teor de lignina na madeira é uma característica fundamental para a seleção 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). Segundo Gomide & Colodette (2007), para a madeira de folhosas são considerados teores de lignina acima de 30% como elevados. Assim, pode-se inferir que o clone I220, cultivado na fazenda Ponte, e o clone I144, cultivado na fazenda Areão, apresentaram altos teores de lignina, sendo, portanto, considerados como de maior potencial para produção de bioenergia entre os clones estudados. Frederico (2009), avaliando cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para o teor de lignina variando de 28,9% a 31,1%, corroborando com o encontrado neste trabalho.

Os resultados obtidos para o teor de lignina na madeira permitem afirmar que os materiais genéticos analisados apresentam potencial para a produção de carvão vegetal, pois a lignina é um componente químico que contribui positivamente para o rendimento gravimétrico devido a sua maior resistência à degradação térmica (Brito & Barrichelo, 1977).

O teor de cinzas (Cz) apresentou diferença significativa entre clones dentro de locais e de locais dentro de clones, exceto para o clone I144. Este clone foi o que apresentou o menor conteúdo de minerais na madeira nos dois locais avaliados, juntamente com o clone 3334 da fazenda Ponte. Os minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa (Brand, 2010), sendo indesejáveis para produção de carvão vegetal para uso siderúrgico. Na literatura (Protásio et al., 2011; Mori et al., 2003; Trugilho et al., 1996) são comumente encontrados baixos valores para o teor de cinzas na madeira de eucalipto (0,07%

a 1%), corroborando com o observado neste trabalho. Os valores médios de cinzas na madeira estão baixos e próximos, não dificultando a utilização energética dos clones avaliados.

O teor de holocelulose (Holo) não apresentou efeito significativo de clone dentro da fazenda Ponte, evidenciando em média 67,4% para os três clones avaliados, sendo o contrário observado para a fazenda Areão, o que demonstra maiores teores de holocelulose para os clones 3334 e I220. Esses clones não apresentaram efeito significativo de local. Já para o clone I144 foi observado efeito significativo de local, indicando elevado teor de holocelulose na fazenda Ponte.

A análise do teor de holocelulose é imprescindível na avaliação energética de clones de *Eucalyptus*. Segundo Santos (2010), a porcentagem de holocelulose corresponde a uma parte da fração mais significativa da massa da madeira e é representada pelos componentes estruturais que são os carboidratos. O comportamento da celulose e das hemiceluloses, diante da degradação térmica, apresenta um perfil bastante instável e pouco resistente, especialmente as hemiceluloses, por ser um composto que apresenta natureza amorfa e ramificada, colaborando para um menor rendimento em carvão vegetal. Frederico (2009) encontrou valores médios para o teor de holocelulose presente na madeira de cinco clones de eucalipto, aos três anos de idade, variando entre 68,18% e 70,53%, assemelhando-se ao observado neste trabalho.

Na Figura 1 encontra-se a relação funcional observada entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* (Pil) e a densidade básica média da madeira (DBm).

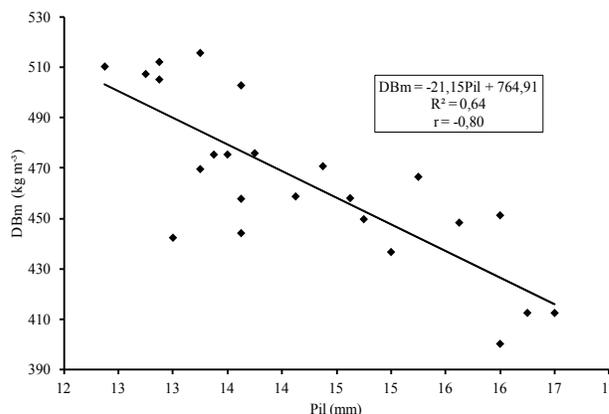


Figura 1. Relação funcional entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* (Pil) e a densidade básica média da madeira (DBm).

Observa-se que as variáveis apresentam correlação linear negativa, ou seja, maiores valores de densidade básica estão associados a menores valores de profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* e vice-versa. Vale et al. (1995) encontraram correlação negativa de -0,55 entre a densidade básica e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*, ou seja, inferior (em módulo) ao encontrado neste trabalho. Já Thierse et al. (2006) encontraram correlação linear de -0,91 e -0,88 para dois clones de eucalipto, sendo superior (em módulo) ao relatado nesse trabalho.

O modelo linear ajustado apresentou todos os coeficientes significativos ($p < 0,001$) e baixo erro padrão da estimativa ($20,02 \text{ kg m}^{-3}$). Além disso, os resíduos do modelo apresentaram normalidade (p -valor = 0,6905),

ausência de autocorrelação (p -valor = 0,06274) e presença de homocedasticidade (p -valor = 0,7274), ou seja, o modelo ajustado atendeu aos pressupostos da análise de regressão e pode ser utilizado para a predição indireta da densidade básica.

Na Tabela 3 encontra-se o resumo das análises de variância realizadas para os teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio e o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*. Observa-se que a interação clone x local foi significativa apenas para os teores de nitrogênio, carbono e oxigênio. Para o teor de hidrogênio e poder calorífico superior somente foi significativo o efeito de local. Os baixos coeficientes de variação experimentais encontrados refletem a alta precisão dos experimentos realizados (Pimentel-Gomes, 2009).

Tabela 3. Resumo das análises de variância realizadas para os teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio e para o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*.

| FV | GL | Quadrado Médio | | | | |
|---------------|-----|----------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| | | N | C | H | O | PCS |
| Local | 1 | 0,0353* | 2,0417* | 0,0337* | 0,940104 ^{ns} | 47348,16* |
| Clone | 2 | 0,0025* | 0,1250 ^{ns} | 0,0067 ^{ns} | 0,127329 ^{ns} | 207,12 ^{ns} |
| Local x Clone | 2 | 0,0037* | 1,2917* | 0,0012 ^{ns} | 1,124829* | 25230,29 ^{ns} |
| Erro | 18 | 0,00014 | 0,2639 | 0,0056 | 0,2944 | 9848,97 |
| | CVe | 9,15 | 1,10 | 1,23 | 1,16 | 2,17 |

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CVe: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; C: Carbono; H: hidrogênio; O: Oxigênio; PCS: poder calorífico superior; *: significativo a 5% pelo Teste F; ^{ns}: não significativo a 5% pelo Teste F.

Na Tabela 4 encontram-se os valores médios dos teores dos componentes elementares (C, H e O), bem como o teste de comparação múltipla realizado.

Tabela 4. Análises dos desdobramentos e testes de comparação múltipla realizados para os teores de nitrogênio, carbono e oxigênio.

| Variáveis (%) | Locais | Clones | | |
|---------------|--------|------------|-----------|-----------|
| | | 3334 | I220 | I144 |
| Nitrogênio | Areão | 0,13 a A | 0,21 c A | 0,10 b A |
| | Ponte | 0,09 a B | 0,08 a B | 0,17 a B |
| Carbono | Areão | 46,5 a b A | 45,75 a A | 46,75 b A |
| | Ponte | 46,75 a A | 47,25 a B | 46,75 a A |
| Oxigênio | Areão | 46,84 a A | 47,70 a A | 46,85 a A |
| | Ponte | 46,97 a A | 46,44 a B | 46,79 a A |

Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha, e maiúscula, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Para a produção de bioenergia é desejável que a madeira apresente altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio, devido às correlações existentes entre esses componentes elementares e o poder calorífico (Protásio et al., 2011). Altas concentrações de oxigênio na biomassa decrescem o poder calorífico (Protásio et al., 2011; Huang et al., 2009; Nordin, 1994), enquanto altos teores de carbono e hidrogênio contribuem para um aumento do poder calorífico dos combustíveis de biomassa (Protásio et al., 2011; Demirbas & Demirbas, 2004). Quanto ao teor de nitrogênio, é desejável que a biomassa apresente baixa quantidade desse constituinte elementar, pois este resulta em poluição ambiental como a formação de óxidos de nitrogênio tóxicos após combustão (Kumar et al., 2010; Bilgen & Kaygusuz, 2008), não apresentando correlação positiva com o poder calorífico (Huang et al., 2009).

Avaliando-se o efeito de clone dentro de local para o teor de nitrogênio, percebe-se que os materiais genéticos apresentaram estatisticamente os mesmos teores desse elemento para a fazenda Ponte, sendo o contrário encontrado para a fazenda Areão. Observa-se que os clones 3334 e I220 procedentes da fazenda Areão apresentaram maior teor de nitrogênio, enquanto que para o clone I144 ocorreu o inverso. Na fazenda Areão, o clone I220 apresentou o maior teor de nitrogênio elementar. No entanto, o teor médio de nitrogênio encontrado para os três clones avaliados foi inferior à média geral (0,30%) determinada por Brand (2010) para a madeira de folhosas, não comprometendo a utilização energética da biomassa.

Quanto ao teor de carbono, o efeito de local dentro de clone foi significativo apenas para o clone I220, sendo observado valor superior para a madeira cultivada na fazenda Ponte. Contudo, esse aumento no teor de carbono foi de apenas 1,5%. Avaliando-se o efeito do fator clone dentro de local, observou-se que os três clones analisados não apresentaram diferença estatística no teor de carbono quando cultivados na fazenda Ponte, o mesmo não foi observado para a fazenda Areão.

Para o teor de oxigênio, o efeito do fator clone dentro de local foi não significativo para as duas localidades e o efeito do fator local dentro de clone foi significativo apenas para o clone I220, evidenciando maior teor de oxigênio elementar na fazenda Areão.

Arantes (2009), ao determinar a variabilidade existente nas características da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos de idade, encontrou valores para o teor de nitrogênio entre 0,13% e 0,23%, assemelhando-se ao encontrado para os clones de *Eucalyptus* avaliados nesse trabalho. Já para os teores de carbono e oxigênio, a autora encontrou valores variando entre 49,51% e 49,84%, e 43,65% e 43,89%, respectivamente, diferindo do encontrado para os clones avaliados. O valor médio para o teor de carbono (48,20%) observado por Protásio et al. (2011), para maravalhas de eucalipto, difere do relatado nesse trabalho para os clones cultivados nas fazendas Areão e Ponte em média 3,38%.

Na Figura 2 encontra-se o teste de comparação múltipla realizado, considerando o local como fator de variação, uma vez que a interação clone x local e o efeito de clone foram não significativos pelo Teste F (p-valor > 0,05) para o teor de hidrogênio e poder calorífico superior.

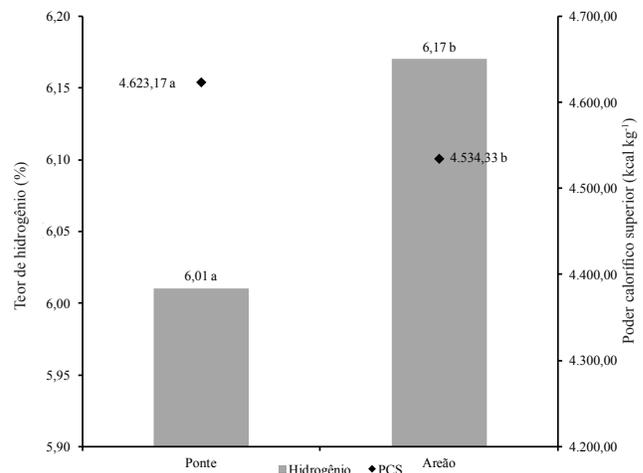


Figura 2. Efeito do local no teor de hidrogênio e no poder calorífico superior da madeira dos clones avaliados. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Observa-se que os clones cultivados na fazenda Areão apresentaram o maior teor de hidrogênio elementar, mas não apresentaram o maior poder calorífico superior. Isso ocorreu provavelmente, devido à baixa variabilidade dos clones estudados quanto a essa característica. Segundo Brand (2010), as madeiras de folhosas apresentam em média 6% de hidrogênio na sua constituição elementar, corroborando com o encontrado neste trabalho para os clones cultivados na fazenda Ponte. Protásio et al. (2011) encontraram teor de hidrogênio para maravalhas de eucalipto de 6,36%, assemelhando ao observado para os clones cultivados na fazenda Areão.

Os valores de PCS encontrados estão coerentes ao relatado na literatura (Protásio et al., 2011; Vale et al., 2000; Brito et al., 1983; Silva et al., 1983). Apesar de significativo o efeito do local de cultivo no PCS, observa-se que os valores encontrados foram semelhantes e para geração de energia são consideradas diferenças superiores a 300 kcal kg⁻¹ (Brand, 2010). Dessa forma, pode-se inferir que o cultivo dos clones de *Eucalyptus* avaliados nas fazendas Areão e Ponte não comprometem a utilização energética dessa biomassa.

Avaliação do carvão vegetal

Na Tabela 5 encontram-se os rendimentos e características encontradas para o carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus* nos diferentes locais de plantio.

Tabela 5. Rendimentos e características encontradas para o carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus* nos diferentes locais de plantio.

| Locais | Clones | RGC | RLP | RGNC | RCF | TMV | TCZ | TCF | PCS | DRA |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Areão | I144 | 31,88 | 44,56 | 23,55 | 25,56 | 19,10 | 0,73 | 80,17 | 7626 | 348,0 |
| | I220 | 30,26 | 46,78 | 22,96 | 24,49 | 18,28 | 0,78 | 80,95 | 7649 | 374,0 |
| | 3334 | 30,54 | 44,96 | 24,50 | 24,35 | 19,38 | 0,88 | 79,74 | 7655 | 331,0 |
| | Média | 30,89 | 45,43 | 23,67 | 24,80 | 18,92 | 0,80 | 80,29 | 7643,3 | 351,0 |
| | CV (%) | 2,81 | 2,59 | 3,28 | 2,66 | 3,03 | 9,67 | 0,76 | 0,20 | 6,17 |
| Ponte | I144 | 32,47 | 32,51 | 35,03 | 25,71 | 20,26 | 0,55 | 79,19 | 7673 | 320,0 |
| | I220 | 32,11 | 46,60 | 21,28 | 26,11 | 18,00 | 0,69 | 81,32 | 7625 | 376,0 |
| | 3334 | 31,65 | 46,00 | 22,35 | 25,08 | 20,03 | 0,72 | 79,26 | 7698 | 311,0 |
| | Média | 32,08 | 41,70 | 26,22 | 25,64 | 19,43 | 0,65 | 79,92 | 7665,3 | 335,7 |
| | CV (%) | 1,28 | 19,12 | 29,16 | 2,03 | 6,40 | 13,20 | 1,51 | 0,48 | 10,49 |

RGC, RLP, RGNC, RCF: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%), em líquido pirolenhoso (%), em gases não condensáveis e em carbono fixo (%), respectivamente; TCF, TMV, TCZ: teor de carbono fixo (%), de materiais voláteis (%) e de cinzas (%), respectivamente; PCS: poder calorífico superior (kcal kg⁻¹); DRA: densidade relativa aparente (kg m⁻³); CV (%): coeficiente de variação amostral.

Observam-se, de maneira geral, baixos coeficientes de variação para as características e rendimentos avaliados no carvão vegetal produzido a partir da madeira dos clones de *Eucalyptus* avaliados nos dois locais. Isso sugere similaridade da qualidade do carvão vegetal produzido e é um indicativo da baixa influência do local e tipo de clone na qualidade desse biocombustível.

Para a produção energética geralmente é desejável obter elevado rendimento gravimétrico, devido à maior produção de carvão vegetal nos fornos de carbonização. Nesse contexto, buscaram-se madeiras com elevada estabilidade térmica, ou seja, com elevado teor de lignina (Trugilho et al., 1997), o que certamente irá influenciar no rendimento em carvão vegetal (Brito & Barrichelo, 1977).

O rendimento em carvão vegetal no Brasil é em média 35% (Rosillo-Calle & Bezzon, 2005), sendo próximo ao encontrado no presente trabalho para a madeira advinda dos clones de *Eucalyptus*. Contudo, o rendimento teórico da carbonização pode chegar a 44% a 55% (Rosillo-Calle & Bezzon, 2005).

Botrel et al. (2007) observaram rendimento gravimétrico médio para vários clones de *Eucalyptus* de 35,03%, diferindo em 4,14% e 2,95% do valor encontrado para os clones de *Eucalyptus* na fazenda Areão e Ponte, respectivamente. Trugilho et al. (2005), avaliando seis clones de *Eucalyptus* spp., encontraram rendimento gravimétrico médio de aproximadamente 40%, diferindo do observado nesse trabalho. Santiago & Andrade (2005), carbonizando o lenho de *Eucalyptus urophylla* até 600 °C encontraram rendimento em carvão vegetal (24,30%) inferior ao observado neste trabalho

para os clones de *Eucalyptus* nos diferentes locais de cultivo. Possivelmente, a idade, composição química da madeira e a temperatura final de carbonização influenciaram nesse resultado.

Quanto ao rendimento em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, Trugilho et al. (2001) e Trugilho et al. (2005) encontraram valores inferiores, sendo que esse resultado é proporcionado pelas diferenças nos rendimentos gravimétricos em carvão obtidos pelos autores em relação ao presente trabalho. Contudo, pode-se constatar que os rendimentos encontrados para os clones de *Eucalyptus* estão próximos da faixa comumente encontrada na literatura para diferentes clones e procedências do gênero *Eucalyptus*, o que demonstra o grande potencial de utilização do carvão vegetal dos clones avaliados nesse trabalho como agente redutor e térmico nas aplicações industriais como o ferro-gusa, o aço e o cimento (Rosillo-Calle & Bezzon, 2005).

Para a utilização energética do carvão vegetal deve-se analisar o teor de carbono fixo, de materiais voláteis e cinzas, pois essas variáveis apresentaram significativas correlações com o poder calorífico do carvão (Majumder et al., 2008; Parikh et al., 2005; Thipkhunthod et al., 2005). Quanto maior o teor de carbono fixo e menor os teores de materiais voláteis e cinza, maior o poder calorífico superior do combustível (Paula et al., 2011; Vale et al., 2001; Trugilho & Silva, 2001). Além disso, combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a queimar-se mais lentamente, permanecendo longo tempo na fornalha para queima total (Brand, 2010; Nogueira & Lora, 2003).

O elevado teor de carbono fixo encontrado para o carvão vegetal produzido a partir da madeira dos clones de *Eucalyptus* demonstra o potencial para o seu uso siderúrgico. Segundo Rosillo-Calle & Bezzon (2005), o carvão vegetal usado na fabricação de aço e ferro-gusa deve ter um teor de carbono fixo superior a 75%, uma vez que o carbono fixo afeta diretamente o consumo específico de redutor (carbono) e, conseqüentemente, a produção de ferro gusa (Braga, 1979). Botrel et al. (2007) e Trugilho et al. (2005) encontraram teor médio de carbono fixo de 74,25 e 69,04%, respectivamente, sendo inferior ao encontrado no presente trabalho para diferentes clones de *Eucalyptus*, reforçando a grande potencialidade energética e industrial do carvão vegetal proveniente dos clones 3334, I144 e I220 avaliados.

O teor médio de materiais voláteis que Botrel et al. (2007) encontraram para diferentes clones de *Eucalyptus* foi de 25,5%, sendo superior ao estabelecido neste trabalho. Contudo, os autores determinaram rendimento em carbono fixo de aproximadamente 26%, próximo ao observado neste trabalho. Os autores ainda encontraram efeito de clone significativo para essa característica, evidenciando a importância da seleção de materiais genéticos que otimizem o rendimento em carbono fixo e, conseqüentemente, a produção energética. No entanto, é válido considerar que os materiais genéticos utilizados por Botrel et al. (2007) diferem daqueles utilizados nesse trabalho.

Quanto ao teor de cinzas, é desejável que o carvão vegetal apresente baixas quantidades, uma vez que altos teores de minerais contribuem para a redução do poder calorífico, visto que eles não participam do processo de combustão (Brand, 2010). Além disso, alto teor de cinza no carvão pode provocar o acúmulo de impurezas no centro das peças do metal solidificado, acarretando variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do ferro-gusa ou ferros-liga. São comumente encontrados na literatura baixos teores desses constituintes (0,16% a 1%) para o carvão vegetal de vários clones e espécies de *Eucalyptus* (Botrel et al., 2007; Trugilho et al., 2005; Trugilho et al., 2001), corroborando com o encontrado neste trabalho.

Avaliando-se a densidade relativa aparente do carvão vegetal, observa-se que em média os clones cultivados na fazenda Areão apresentaram maior destaque (351 kg m⁻³). Isso pode ser vantajoso, pois maximiza a densidade energética do carvão, ou seja, ocorre um aumento na quantidade de energia por unidade de volume do combustível e aumento

da resistência mecânica do carvão nos altos fornos das siderúrgicas. Botrel et al. (2007) encontraram densidade relativa aparente do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* variando de 280 kg m⁻³ a 402 kg m⁻³.

Observam-se valores similares para o PCS do carvão vegetal dos diferentes clones nas duas localidades, em média, 7.643,3 e 7.665,3 kcal kg⁻¹ para as fazendas Areão e Ponte, respectivamente. Isso é um indicativo de que tanto os locais quanto os clones avaliados não influenciaram de maneira significativa nessa característica, evidenciando a potencialidade de produção bioenergética nos locais considerados. Lima et al. (2011) encontraram valor médio para o PCS do carvão vegetal de *Eucalyptus bethamii* de 8.777 kcal kg⁻¹, sendo superior ao encontrado para os clones avaliados em 15%, demonstrando a influência do material genético no valor calórico do carvão.

Conclusões

Verificou-se, de maneira geral, efeito significativo da interação clone x local de cultivo para as características avaliadas na madeira, demonstrando a sua influência na qualidade da biomassa.

Os clones I144 e I220, por apresentarem maiores valores de densidade básica da madeira, foram considerados os mais indicados para produção de bioenergia. Esses clones também apresentaram elevado teor de lignina, o que os qualifica para a produção de carvão vegetal.

O carvão vegetal avaliado apresentou potencial para o uso siderúrgico devido ao seu elevado teor de carbono fixo. De maneira geral, a qualidade do carvão vegetal não foi influenciada pelo local ou clone.

O modelo linear ajustado entre a densidade básica e a penetração do pino do *Pilodyn* pode ser utilizado para a predição indireta da densidade básica média dos clones avaliados.

Referências

- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília, DF: ABRAF, 2011. 130 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M11/77**: teor de cinzas. São Paulo, 1974a. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M3/69**: métodos de ensaio. São Paulo, 1974b. 8 p.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, GB, v. 85, n. 8, p. 776–785, 2008.
- 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, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.
- BRAGA, R. N. B. Os parâmetros da qualidade do carvão e seus reflexos na produção de gusa. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, SP, n. 73, 1979. 15 p.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- 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. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, SP, n. 14, p. 9-20, 1977.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, SP, n. 23, p. 53-56, 1983.
- DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, Oxford, GB, v. 42, n. 2, p. 183-188, 2001.
- 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. 126 p.
- FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- GOLDSCHIMID, 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.; COLODETTE, J. L. Qualidade da madeira. In: BORÉM, A. (Ed.). **Biotecnologia florestal**. Viçosa, MG: [Universidade Federal de Viçosa], 2007. p. 25-54.
- 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.
- 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, MG, v. 3, n. 2, p. 349–358, 2011.
- HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, GB, n. 29, p. 1793–1797, 2009.
- KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, v. 21, n. 4, p. 514–516, 2010.
- 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. DOI: 10.4336/2010.pfb.31.65.09
- MAJUMDER, A. K.; JAIN, R.; BANERJEE, P.; BARNWAL, J. P. Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. **Fuel**, London, GB, v. 87, n. 13-14, p. 3077-3081, 2008.
- 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, SP, v. 23, n. 3, p. 396-400, 2003.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.
- NORDIN, A. Chemical and elemental characteristics of biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, GB, v. 6, n. 5, p. 339–347, 1994.
- OLIVEIRA, A. D.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S. Estimativa de massa lenhosa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. **Ciência e Prática**, Lavras, MG, v. 15, n. 4, p. 345-348, 1991.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, London, GB, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005.
- 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, MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba, SP: FEALQ, 2009. 451 p.
- 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. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.113
- 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, MG, v. 2, n. 2, p. 147-153, 1983.
- ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.
- SANTIAGO, A. R.; ANDRADE, A. M. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005.
- SANTOS, R. C, dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL ex MAIDEN, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2001. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SILVA, L. B. X.; REICHMANN NETO, F.; TOMASELLI, I. Estudo comparativo da produção de biomassa para energia entre 23 espécies florestais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1983, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1983. p. 872-878.
- SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, 2006.
- 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, MG, v. 12, n. 3, p. 264-278, 2006.
- THIPKHUNTHOD, P.; MEEYOO, V.; RANGSUNVIGIT, P.; KITTYANAN, B.; SIEMANOND, K.; RIRKSOMBOON, T. Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, London, GB, v. 84, n. 7-8, p. 849-857, 2005.
- 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, MG, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.
- 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, MG, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, PR, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, MG, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- 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, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. **Caracterização da madeira e da casca de *Sclerobolium paniculata*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético**. Botucatu: UNESP, 2000. 26 p.
- VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 89, p. 89-95, 2001.
- 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, MG, v. 19, n. 1, p. 80-91, 1995.
- VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).
- WEHR, T. R. **Variação nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimentos Kraft**. 1991. 84 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Piracicaba, SP.