



THIAGO ANDRADE NEVES

**QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL
DE CLONES DE *Eucalyptus* CULTIVADOS NO SUL DE
MINAS GERAIS**

LAVRAS - MG

2012

THIAGO ANDRADE NEVES

**QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE CLONES
DE *Eucalyptus* CULTIVADOS NO SUL DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS - MG

2012

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Neves, Thiago Andrade.

Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de
Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais / Thiago Andrade
Neves. – Lavras : UFLA, 2012.

94 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Eucalipto. 2. Biorredutor. 3. Biomassa. 4. Bioenergia. 5.
Siderurgia. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

THIAGO ANDRADE NEVES

**QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE CLONES
DE *Eucalyptus* CULTIVADOS NO SUL DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 3 de fevereiro de 2012.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho UFLA

Prof. Dr. Natalino Calegário UFLA

Dr. Leonardo Chagas de Sousa SAINT-GOBAIN PAM BIOENERGIA

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Orientador

LAVRAS – MG

2012

AGRADECIMENTOS

A Deus

Aos meus pais, João Silva Neves e Maria Noêmia Maffia Andrade, pela confiança, amor, carinho e apoio.

Aos meus irmãos, João Victor e Daniela, pela amizade, companheirismo, confiança e incentivo.

Ao meu orientador e professor Paulo Trugilho, pela orientação, aprendizagem, amizade e confiança nos trabalhos, que sempre serão lembrados.

Ao tio Toninho, pela oportunidade de estágios em empresas florestais e pelo apoio na carreira profissional.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pelos ensinamentos transmitidos.

À Capes, pela concessão da bolsa.

A empresa Saint-Gobain PAM Bioenergia, por ter concedido o material de estudo.

A todos os meus amigos do Laboratório CTM.

Aos grandes e eternos amigos adquiridos na universidade e na República Copo Sujo, pela amizade e pela convivência.

A Tetê, pelo apoio, carinho e companheirismo em toda a escrita da dissertação.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de avaliar o efeito da idade, do material genético e do local na qualidade da madeira e do carvão vegetal, em clones de *Eucalyptus* plantados no sul de Minas Gerais e verificar a correlação entre as análises não destrutivas da madeira com as características da madeira e do carvão vegetal. Foram amostrados 7 clones de *Eucalyptus* sp. da empresa Saint-Gobain PAM Bioenergia, localizada nos municípios de Bom Jardim de Minas e Lima Duarte, ambos em Minas Gerais. Foram coletadas amostras de madeira em quatro locais distintos, cada local com suas idades consideradas. Em todos os locais, o espaçamento de plantio foi de 3,5 m x 2,5 m e o tipo de solo denominado de Latossolo e Cambissolo. Determinaram-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 delineamento inteiramente casualizado, disposto em um esquema fatorial 3 x 2. As análises estatísticas das características avaliadas no carvão vegetal foram realizadas de forma descritiva com base na média e coeficiente de variação. Os resultados mostram que, no geral, o efeito significativo da idade na qualidade da madeira. As características avaliadas na madeira, em especial a densidade básica, apresentaram certa tendência de aumento com a idade, em todos os clones. O carvão vegetal produzido apresentou potencial para ser utilizado na siderurgia, devido ao elevado teor de carbono fixo, acima de 75%. De modo geral, o efeito significativo da interação clone x local de cultivo para as características avaliadas na madeira foi significativo, demonstrando a sua influência na qualidade da biomassa. A penetração do pino do *Pilodyn* foi satisfatória nos clones avaliados, mostrando-se eficaz para a predição da densidade básica, em condição de campo. Com a exceção da fazenda Ponte foi possível obter elevados ajustes para os modelos e baixo erro padrão da estimativa. A correlação entre as avaliações não destrutiva com as características do carvão vegetal mostrou-se de baixa magnitude.

Palavras-chave: Qualidade da Madeira, Biomassa, Bioenergia, Siderurgia.

ABSTRACT

This research aimed to assess the effects of age, genetic material and place of planting on wood quality and charcoal, and to verify the correlation between nondestructive analysis of wood with the characteristics of wood and charcoal. Seven clones of *Eucalyptus sp.* were sampled from the company Saint-Gobain Canalização, located in the municipalities of Bom Jardim de Minas and Lima Duarte, both on Minas Gerais State. The wood samples were taken in four different places, considering the age of each one. In all the places the planting spacing was 3,5 m x 2,5 m and the soil type called latosoil and cambisoil. The penetration depth of a steel pin on *Pilodyn* to 1,30 m high from soil (DAP), the mean basic density (DBm), the mean basic density on DAP, gross calorific value and lignin, extractives, ashes and holocellulose contents and elemental chemical analysis (C, H, N and O) were determined. The wood was carbonized and the produced charcoals were assessed quantitatively and qualitatively. On the assessment of wood characteristics a completely randomized design in a factorial scheme 3x2 were used, and the analysis of evaluated characteristics on charcoal were done descriptively based on the average, standard error and coefficient of variation. The results show that, in general, the significant age effect in the wood quality. All the clones presented great potential for energetic use. The characteristics evaluated on wood, especially basic density, presented a tendency to increase with age in all the clones, specially the genetic materials I-220 and 1277, which presented the highest basic densities. The charcoal produced presented potential to be used by steel metallurgy due to the great content of fixed carbon, higher than 75%. The penetration depth of a steel pin on *Pilodyn* was satisfactory on the evaluated clones, composing an effective way to predict wood basic density, in field condition. The adjusted linear models, except for Ponte farm, it was possible to obtain high adjustments for the models and low standard error of the estimate. The significant effect of the interaction, clone x place of planting, for the evaluated characteristics in the wood, demonstrates the dependence between the two factors and your influence on the biomass quality. The correlation between nondestructive assessments and charcoal characteristics was shown of low magnitude.

Keywords: Wood quality. Biomass. Bioenergy. Steel metallurgy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal	12
2.1.1	Densidade básica	13
2.1.2	Teor de umidade	14
2.1.3	Poder calorífico	14
2.5	Composição química	15
2.5.1	Composição química elementar	16
2.6	Propriedades do carvão vegetal	17
2.6.1	Densidade relativa aparente	17
2.6.2	Rendimento gravimétrico	18
2.6.3	Composição química imediata	20
2.7	Amostragem na madeira	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	Material biológico e amostragem	23
3.1.1	Amostragem destrutiva	23
3.1.2	Amostragem não-destrutiva	24
3.2	Análises químicas, física e energética na madeira	24
3.3	Carbonizações e avaliação do carvão vegetal	26
3.4	Análises estatísticas	27
3.4.1	Avaliação dos efeitos de clone e idade por local	27
3.4.2	Avaliação do efeito de clone e local	27
3.4.3	Análise de correlação e ajuste de modelos estatísticos	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	Avaliação dos efeitos de clone e idade por local	30
4.1.1	Características avaliadas na madeira	30
4.1.1.1	Fazenda Aliança	30
4.1.1.2	Fazenda Areão	36
4.1.1.3	Fazenda Brejos	41
4.1.1.4	Fazenda Ponte	46
4.1.2	Características avaliadas no carvão vegetal	53
4.2	Avaliação do efeito de clone e local	59
4.2.1	Primeira avaliação (56 meses)	59
4.2.1.1	Características avaliadas na madeira	59
4.2.1.2	Características avaliadas no carvão vegetal	63
4.2.2	Segunda avaliação (68 meses)	67
4.2.2.1	Características avaliadas na madeira	67
4.2.2.2	Características avaliadas no carvão vegetal	75
4.3	Correlações e modelos ajustados	79

5	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	86

1 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, o que está diretamente relacionado à grande variabilidade da qualidade da madeira das suas diversas espécies/clones. 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 e 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 o maior produtor e consumidor, pois tem 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. Entre elas, é renovável, menos poluente (tem baixo teor de cinzas), praticamente isento de enxofre/fósforo e a tecnologia de fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (ANUÁRIO..., 2011).

A produção e a qualidade do carvão vegetal, por sua vez, são influenciadas pela madeira e pelo sistema adotado na transformação.

Característica como o incremento volumétrico da árvore podem 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, contribui de forma positiva para o rendimento em carvão vegetal (TRUGILHO et al., 1997).

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 apresentarem alta densidade básica, baixo teor de cinzas, alto teor de lignina e que tenham fibras de parede celular mais espessa e de menor largura serão responsáveis pela qualidade e o rendimento do carvão vegetal. Essas características podem ser consideradas um indicativo de qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal.

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, como, por exemplo, a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*. Este equipamento é utilizado para se fazer inferência a respeito da densidade básica (GOUVÊA et al., 2011; ROSADO;

BRUNE; OLIVEIRA, 1983; THIERSC et al., 2006; VALE et al., 1995), fornecendo, assim, subsídios para a seleção e a avaliação preliminar de grande número materiais genéticos para a produção energética em condição de campo. O uso de técnicas não destrutivas tem aumentado grandemente nos últimos anos e com resultados satisfatórios.

Portanto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar o efeito da idade, do material genético e local na qualidade da madeira e do carvão vegetal em clones de *Eucalyptus* plantados em Minas Gerais. Os objetivos específicos foram: 1) avaliar a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*® na circunferência do tronco das árvores e 2) determinar a relação entre a avaliação não destrutiva e a destrutiva da madeira e do carvão vegetal produzido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Propriedades da madeira para a produção de carvão vegetal

Para definir o melhor uso de uma madeira, devem-se estudar as suas características, definindo-se assim sua qualidade que, por sua vez, pode ser definida como um atributo ou condição que distingue um determinado produto. Em termos mais gerais, seria a adequação ao uso ao que se pretende. Para o caso da madeira, os parâmetros principais da qualidade são: a) tecnológicos – físicos, mecânicos, químicos e anatômicos e b) não tecnológicos - espécie, procedência, idade, taxa de crescimento, forma, conicidade da árvore, etc. (BARRICHELO, 1992).

A produção e a qualidade do carvão vegetal são influenciadas pela madeira e pelo sistema adotado na transformação. Características tecnológicas, tais como teor de umidade, teor de lignina e densidade básica, além das estimativas de massa seca e massa de lignina, e o poder calorífico da madeira são propriedades geralmente utilizadas na determinação da sua qualidade para fins energéticos. Essa avaliação é realizada com o objetivo de promover uma classificação de genótipos superiores mais aptos à sua multiplicação em escala comercial, gerando futuros projetos de reflorestamento em função do uso industrial da madeira produzida. Os atributos da madeira e algumas estimativas servem para promover a diferenciação entre materiais genéticos com diferentes incrementos volumétricos e que estão relacionados com o seu uso energético (LIMA; SILVA; LAVORANTI, 2011; OLIVEIRA; LIMA; ROSADO, 1991; TRUGILHO et al., 2001).

Dentre as propriedades da madeira, a mais estudada é a densidade básica, a qual é relação entre o material lenhoso seco por unidade de volume verde ou saturado, estando relacionada a muitas características tecnológicas

fundamentais para a produção e a utilização dos produtos florestais. Ela é considerada um dos parâmetros mais importantes entre as diversas propriedades físicas da madeira, pois afeta a maioria das propriedades. Seus efeitos, porém, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente (SHIOYAMA, 1990). Para fins de definição de valores econômico, ecológico e uso potencial das espécies, a sua composição química, especialmente o teor de lignina, é uma boa ferramenta, além da densidade básica, para caracterizá-la como uma matéria-prima renovável e potencial, disponível para a produção de energia (SANTOS, 2010).

A seguir serão discutidas as principais características da madeira, associadas à produção e à qualidade do carvão vegetal.

2.1.1 Densidade básica

A densidade básica da madeira é considerada um índice para a avaliação de qualidade da madeira (FOELKEL; MORA; MENOCELLI, 1990; GARCIA, 1995; MOURA; FIGUEIREDO, 2002).

Brasil e Ferreira (1971) relatam que a densidade da madeira é um dos índices mais importantes a serem considerados dentre as diversas propriedades físicas da madeira, pois, além de afetar as demais propriedades, interfere de forma significativa na qualidade de seus derivados.

Para a produção de carvão vegetal é desejável que a madeira apresente elevada densidade básica, pois quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido para um determinado volume.

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 esta

se relaciona diretamente com a produção de carvão vegetal (LIMA; SILVA; LAVORANTI, 2011; TRUGILHO et al., 2001).

Além disso, o uso de madeiras de maiores densidades, para fins energéticos, apresenta as seguintes vantagens: a) menor área de estocagem e manuseio da madeira; b) maior rendimento energético no transporte; c) maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira; d) maior rendimento dos gaseificadores da madeira para produção de gás oxigênio ou gás de síntese do metanol e e) maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida (PEREIRA et al., 2000).

2.1.2 Teor de umidade

O teor de umidade que a madeira apresenta é muito amplo, variando significativamente da casca até a medula. Segundo Cunha et al. (1989), quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da água, o qual consome grande quantidade energia. É muito importante que a madeira a ser utilizada como combustível apresente baixos teores de umidade, no intuito de aumentar a eficiência do combustível e diminuir custos com o manejo e transporte. A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vai depender, basicamente, da temperatura em que foi obtido e da umidade do ambiente ao qual está exposto.

2.1.3 Poder calorífico

Na seleção de clones/espécies de *Eucalyptus* para a produção de energia é fundamental a quantificação do poder calorífico, uma vez que essa característica é um excelente parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassa (BRAND, 2010; FRIEDL et al., 2005;

PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005). O poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível.

O poder calorífico é chamado de superior (PCS) quando a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante o processo é condensada e o calor latente do vapor d'água não é perdido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984; BRAND, 2010; FRIEDL et al., 2005). Já o poder calorífico inferior é a quantidade de energia disponível quando não se considera o calor latente de condensação da umidade presente nos produtos de combustão (BRAND, 2010).

Um acréscimo do teor de carbono fixo e um decréscimo no teor de materiais voláteis proporciona um aumento no poder calorífico superior (TRUGILHO; SILVA, 2001; VALE; DIAS; SANTANA, 2010). Quanto maior a temperatura final de carbonização maior o teor de carbono fixo, menores o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis e maior o poder calorífico superior do carvão vegetal. Porém, o teor de umidade é o grande redutor do poder calorífico nos combustíveis convencionais.

2.5 Composição química

É fundamental o conhecimento da composição química da madeira para que se possa direcioná-la para determinados usos. Os constituintes químicos presentes na biomassa são holocelulose, lignina, extrativos e cinzas (BRAND, 2010).

Segundos relatos, elevado teor dos componentes fundamentais, tanto os extrativos como a lignina, resulta em um carvão com maior densidade e mais resistente, em termos de propriedades físico-mecânicas, porém, é indesejável a presença de altos teores de holocelulose, quando se destina à produção de carvão

vegetal, devido à sua maior instabilidade à degradação térmica (KLOCK et al., 2005; SANTOS, 2010). As ligações presentes na celulose e nas hemiceluloses, diante da degradação térmica, apresentam um perfil bastante instável e pouco resistente. A quantificação e a análise do teor de lignina na madeira são características fundamentais 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). Os extrativos não fazem parte da parede celular, portanto, eles são encontrados na parede celular de forma acidental.

Os minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa (BRAND, 2010), sendo indesejáveis para a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico. A quantidade deste composto é considerada pequena quando comparada à dos demais constituintes químicos. Elevados teores de mineral na madeira proporcionam altas percentagens de cinzas no carvão, o que se torna prejudicial quando este carvão se destina a fins siderúrgicos (ANDRADE, 1993).

Na literatura (MORI et al., 2003; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996) são comumente encontrados baixos valores para o teor de cinzas na madeira de eucalipto (0,07 a 1%). Trugilho et al. (2001), ao estudarem clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal, mencionam, como características químicas desejáveis no carvão produzido, o baixo teor de materiais voláteis e de cinzas e os maiores teores de carbono fixo.

2.5.1 Composição química elementar

Segundos relatos, as madeiras de diferentes espécies apresentam-se uniformes em relação à composição química elementar, sendo em torno de 50%

para o carbono, 6% de hidrogênio, 43% de oxigênio e 0,5% de nitrogênio (DOAT, 1977; KLOCK et al., 2005; OLIVEIRA et al., 1982; PENEDO, 1980).

Estes mesmos autores relatam que a presença de enxofre ocorre em quantidades insignificantes, quando comparadas com as de qualquer combustível fóssil. 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. Altas concentrações de oxigênio na biomassa favorecem o decréscimo do poder calorífico (HUANG et al., 2009; NORDIN, 1994), enquanto altos teores de carbono e hidrogênio contribuem para um aumento no poder calorífico dos combustíveis de biomassa (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004). Quanto ao teor de nitrogênio, é desejável que a biomassa apresente baixas quantidades desses constituintes elementares, pois estes resultam em poluição ambiental, como a formação de óxidos de nitrogênio tóxicos após combustão (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; KUMAR et al., 2010) e não apresente correlação positiva com o poder calorífico (HUANG et al., 2009).

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 teores de C variando entre 49,51% a 49,84%, de N entre 0,13% e 0,23% e de O entre 43,65% e 43,89%.

2.6 Propriedades do carvão vegetal

2.6.1 Densidade relativa aparente

Em se tratando em qualidade do carvão vegetal, a densidade é considerada um dos melhores índices. A densidade do carvão é afetada pela

matéria-prima que se originou e pelo processo de carbonização, como a temperatura final e a taxa de aquecimento do processo. Segundo Mendes, Gomes e Oliveira (1982), a densidade do carvão afeta diretamente as suas propriedades, podendo variar em função da granulometria e da presença de trincas. Segundo Pimenta e Barcelos (2000), menor densidade do carvão vegetal tem como consequência uma menor utilização do volume no alto-forno. Esse mesmo autor relata que, para uso siderúrgico, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível.

2.6.2 Rendimento gravimétrico

Para a produção energética, geralmente, é desejável obter elevado rendimento gravimétrico e, como consequência, maior produção de carvão vegetal nos fornos de carbonização. Nesse contexto, buscam-se madeiras com elevada estabilidade térmica, o que certamente irá influenciar o rendimento em carvão vegetal. Botrel et al. (2007) observaram rendimento gravimétrico médio para vários clones de *Eucalyptus* de 35,03%, utilizando temperatura final de carbonização de 450°C e taxa de aquecimento de 1,67°C. Já Santiago e Andrade (2005), carbonizando o lenho de *Eucalyptus urophylla* até 600 °C, encontraram rendimento em carvão vegetal próximo de 24,30%.

Segundos relatos na literatura, a lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização e a qualidade do carvão produzido estão diretamente relacionados aos teores presentes na madeira. Segundo Oudia et al. (2007), uma relação bastante importante presente na lignina, que influencia diretamente o rendimento gravimétrico, é a relação siringila/guaiacila (S/G), ou seja, é a proporção entre as unidades siringila e guaiacila presentes na lignina. Tendo em vista que a diferença química estrutural presente nos diferentes tipos

de lignina pode afetar o rendimento da carbonização em função do posicionamento do grupo funcional no anel aromático, tornando esse mais ou menos reativo, a relação S/G pode ser estabelecida como um parâmetro global da qualidade tecnológica da madeira, uma vez que abrange vários fatores, dentre eles características anatômicas e químicas. Essa característica poderá, dessa forma, também, auxiliar nos processos de seleção de clones, a fim de se obter árvores com maior qualidade para a produção de carvão, em termos de reatividade e rendimento em carbono fixo.

Segundo Gutiérrez, Rodríguez e Rio (2006), maiores proporções de unidades guaiacila (G) em relação às unidades siringila (S) são desejáveis quando se pretende utilizar a madeira para a produção de carvão, pois esse fato contribuiria para o maior rendimento gravimétrico em carvão.

A seleção de madeiras com a menor relação S/G é uma das tendências do setor de produção de carvão vegetal para aumentar o rendimento e, conseqüentemente, reduzir os custos com matéria-prima.

Outra característica bastante importante no processo de carbonização é a taxa de aquecimento e temperatura final da carbonização. Pinheiro, Figueiredo e Seye (2005) estudaram a influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. cloeziana* e *Corimbia citriodora*, com idade entre 6,5 e 7,5 anos e verificaram que, para todas as espécies analisadas, quanto menor a temperatura e a taxa de aquecimento, maior é o rendimento da carbonização. Os mesmos autores concluíram que a temperatura ótima do processo de carbonização foi na faixa de 300 °C a 450 °C, para todas as espécies analisadas, tanto do ponto de vista quantitativo (rendimento gravimétrico) quanto do ponto de vista qualitativo (teor de carbono fixo).

2.6.3 Composição química imediata

Para a utilização energética do carvão vegetal deve-se analisar o teor de carbono fixo, de materiais voláteis e de cinzas, pois essas variáveis apresentaram significativas correlações com o poder calorífico do carvão (MAJUMDER et al., 2008; PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005; THIPKHUNTHOD et al., 2005). Além disso, combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a queimarem-se mais lentamente, ou seja, eles poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para queima total, quando comparados com combustíveis que possuam baixo índice de carbono fixo (BRAND, 2010; NOGUEIRA; LORA, 2003). Segundo estes mesmos autores, o carvão vegetal utilizado na fabricação de aço e de ferro-gusa deve ter um teor de carbono fixo superior em torno de 75%.

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, podem provocar o fenômeno da segregação no ferro-gusa, ferro-liga e no carbureto de cálcio. 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., 2001, 2005).

2.7 Amostragem na madeira

A amostragem da madeira permite avaliar as relações existentes entre uma proporção representativa do tronco e uma população ou lote, viabilizando o estudo da propriedade em larga escala. O primeiro passo no desenvolvimento de

estratégias de amostragem apropriadas é a identificação das propriedades relevantes destinadas ao produto final desejado (DOWNES et al., 1977).

Zobel e Buijtenen (1989) afirmam que a forma de amostragem é um dos maiores entraves para se obter resultados significativos que representem toda a árvore, devido à grande variabilidade das características anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira.

Na madeira, a amostragem pode ser efetuada de forma destrutiva ou não destrutiva. Atualmente, com o aperfeiçoamento das técnicas de amostragem não destrutivas, o número de amostras tem sido consideravelmente reduzido, porém, existe a necessidade do ajuste via técnica destrutiva. Em função da grande variabilidade das propriedades da madeira, há dificuldade em se definir um padrão de amostragem destrutiva, que garanta uma representatividade dessa variabilidade. Nesse sentido, observa-se, na literatura, uma carência de informações necessárias para o estabelecimento de um programa adequado de amostragem da madeira, que leve em consideração um nível de acurácia, tempo de realização e custo desejado, para que as informações possam expressar com eficiência o valor médio da característica no tronco.

Dentre os tipos de amostragem não destrutiva destaca-se o *Pilodyn*®, devido à simplicidade de aplicação. Segundo Hasen (2000), o aparelho *Pilodyn*® é utilizado para estabelecer a correlação entre a profundidade de penetração de sua haste e a densidade da madeira. Outros autores relatam que a estimativa indireta da densidade básica mostrou resultados satisfatórios, quando se buscou agrupar indivíduos por classe diamétrica, e também que foi possível obter diferença somente entre espécies (MOURA; BARNES; BIRKS, 1987; RAYMOND; MACDONALD, 1998; VALE et al., 1995). Ainda segundo estes autores, as árvores com menores valores de densidades apresentaram maiores valores para a penetração do pino do *Pilodyn*.

Hasen (2000) relata que o uso de *Pilodyn* está muito voltado para a pesquisa de melhoramento genético, especialmente para seleção massal.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material biológico e amostragem

3.1.1 Amostragem destrutiva

Foram amostrados sete clones de *Eucalyptus* sp. da empresa Saint-Gobain Pam Bioenergia, localizada nos municípios de Bom Jardim de Minas e Lima Duarte, ambos em Minas Gerais. Na região de coleta, a temperatura média e a precipitação anual são de 20,4 °C e 1.250 mm, respectivamente. Foram coletadas amostras em quatro locais distintos, denominados de Fazenda Areão (21°51'S; 40°07'W), Fazenda Ponte (21°51'S; 44°10'W), estas duas localizadas em Bom Jardim de Minas, e Fazenda Brejos (21°46'S; 44°02'W) e Fazenda Aliança (21°45'S; 44°02'W), localizadas em Lima Duarte. Em todos os locais, o espaçamento de plantio foi de 3,5 x 2,5m e os tipos de solo, nas quatro fazendas, eram Latossolo e Cambissolo. Os clones amostrados foram I-144 e I-220, provenientes da empresa Acesita Energética; 3334, 3335 e 3281, da empresa Plantar e o 1277 e 0321, da empresa Copener Bahia. Na Tabela 1 estão identificados a localidade, os clones e as respectivas idades.

Foram amostradas, de forma casual, quatro árvores de cada clone e local, sendo retirados discos de 2,5 cm de espessura a 2%, 10%, 30%, 50% e 70% da altura comercial da árvore (considerada até um diâmetro mínimo de 5 cm com casca), conforme recomendado por Pádua (2009), além de um disco extra a, aproximadamente, 1,30 m de altura do solo (DAP).

Tabela 1 Local de coleta dos clones e suas respectivas idades

Fazenda	Município	Clones	1º avaliação (meses)	2º avaliação (meses)
Areão	Bom Jardim de Minas	I-144	57	69
		I-220		
		3281		
		3334		
Brejos	Lima Duarte	I-144	49	61
		I-220		
Aliança	Lima Duarte	1277	46	58
		0321		
Ponte	Bom Jardim de Minas	I-144	55	67
		I-220		
		3334		
		3335		

3.1.2 Amostragem não destrutiva

A avaliação não destrutiva foi composta pela determinação da resistência à penetração do pino do *Pilodyn*®. Para 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.

3.2 Análises químicas, física e energética na madeira

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas opostas, passando pela medula. As duas menores cunhas foram utilizadas na determinação da densidade básica da madeira, seguindo os preceitos da norma NBR 11941 (ABNT, 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, dos extrativos totais, das cinzas e dos componentes elementares (C, H, N e S), foi utilizada uma amostra composta, contendo material dos pontos longitudinais de amostragem 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 previstas nas normas M 11/77 e M 3/69 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP, 1974), respectivamente. O teor de holocelulose foi obtido por diferença, conforme a Eq. 1, a seguir.

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

em que Lig é o teor de lignina total (%), Ext é o teor de extrativos totais (%) e Cz é o teor de cinzas na madeira (%).

Para a análise elementar, as amostras compostas foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira 200 mesh e ficou retida na de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em relação à massa seca da madeira foi realizada em um analisador universal da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube. O analisador utiliza, como gases de arraste e ignição, o hélio e o oxigênio,

respectivamente. 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, modelo IKA C-200, conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

3.3 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 proveniente dos discos retirados das árvores, previamente seca em estufa, a 103±2 °C. 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 (BOTREL et al., 2007; TRUGILHO et al., 2001, 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, o de carbono fixo, conforme procedimento estabelecido na norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

3.4 Análises estatísticas

3.4.1 Avaliação dos efeitos de clone e idade por local

Na avaliação das características quantificadas na madeira, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial 4 x 2, para as fazendas Areão e Ponte, e 2 x 2 para as fazendas Aliança e Brejos, considerando-se como fatores os diferentes clones e a idade e quatro repetições. O modelo estatístico está apresentado na Eq. 2. Utilizou-se o Teste de Tukey, a 5% de significância, para a 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 ($i = 1, 2, 3$ e 4 ou 1 e 2), no j -ésimo nível do fato idade ($j = 1$ 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 ($i = 1, 2, 3$ e 4 ou 1 e 2), efeito fixo; β_j é o efeito do j -ésimo nível do fator idade ($j = 1$ 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_{ij} , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância σ^2 .

3.4.2 Avaliação do efeito de clone e local

Na avaliação das características quantificadas na madeira, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, disposto em um esquema fatorial 3 x 2, considerando-se como fatores os diferentes clones e os locais de cultivo e quatro repetições, empregado para as duas avaliações, conforme modelo estatístico

apresentado na Equação 3. Utilizou-se o Teste de Tukey, a 5% de significância, para a comparação múltipla das médias.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

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_{ij} , independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância σ^2 .

3.4.3 Análise de correlação e ajuste de modelos estatísticos

A análise das características avaliadas no carvão vegetal foi realizada de forma descritiva com base na média, no desvio padrão e no coeficiente de variação.

Foram avaliadas as correlações lineares simples entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* e a densidade básica da madeira por local de amostragem. Posteriormente, foram ajustados modelos estatísticos lineares simples entre a densidade básica média da árvore e profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* (P). Foram determinados o erro padrão residual (S_{xy}) e o coeficiente de variação de cada modelo ajustado. Os modelos foram ajustados com base no método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), que visa à minimização do erro.

Procedeu-se também a análise de correlação linear entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* e o rendimento gravimétrico. Utilizou-se o teste t, a 5% de significância, para verificar se o coeficiente de correlação é igual a zero e, conseqüentemente, avaliar a existência de uma relação linear entre as variáveis.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o *software* R 2.11.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação dos efeitos de clone e idade por local

4.1.1 Características avaliadas na madeira

4.1.1.1 Fazenda Aliança

Na Tabela 2 encontra-se o resumo da análise de variância realizada para a análise elementar e o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*.

Tabela 2 Resumo da análise de variância realizada para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*

F.V	GL	Quadrado médio					
		C	H	N	S	O	PCS
Clone (C)	1	3,6768 ^{ns}	0,6630 ^{ns}	0,0033 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	4,4944 ^{ns}	2704 ^{ns}
Idade (I)	1	23,5467*	3,5043*	0,0885*	0,0034*	50,1264*	7140 ^{ns}
C x I	1	0,3108 ^{ns}	0,0170 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,4356 ^{ns}	2550 ^{ns}
Erro	12	1,4991	0,0436	0,0012	0,0001	1,9925	2455 ^{ns}
	Cve	2,63	3,42	19,06	95,07	3,00	1,07

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; C: carbono; O: oxigênio; S: enxofre; PCS: poder calorífico superior; *: significativo, a 5%, pelo Teste F; ^{ns}: não significativo, a 5%, pelo Teste F

Observa-se, pelos dados da Tabela 2, que o efeito da interação clone x idade foi não significativo para as variáveis analisadas, evidenciando a não existência de dependência entre os fatores considerados (clone e idade). Para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, observou-se que o efeito do fator idade foi significativo, a 5% de probabilidade. Entretanto, o poder

calorífico superior não foi observado efeito significativo da idade e do efeito clone. Os baixos coeficientes de variação experimentais encontrados refletem a alta precisão dos experimentos realizados (PIMENTEL-GOMES, 2009). Observa-se que somente o coeficiente de variação do teor de enxofre foi bastante alto, fato que pode ser explicado pela ausência deste constituinte em alguma idade avaliada, fazendo com que a variabilidade aumente.

Na Tabela 3 os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado.

Tabela 3 Efeito da idade e do clone no teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e poder calorífico superior da madeira dos clones avaliados

Característica	Idade (meses)		Variáveis	Clones	
	46	58		1277	0321
C	47,82 a	45,39 b	C	47,08 a	46,12 a
H	6,57 a	5,63 b	H	6,16 a	6,04 a
N	0,28 a	0,11 b	N	0,17 a	0,19 a
S	0,02 a	0,00 b	S	0,016 a	0,012 a
O	45,31 a	48,85 b	O	46,55 a	47,61 a
PCS	4604 a	4646 a	PCS	4612 a	4638 a

C: teor de carbono (%); H: teor de hidrogênio (%); N: teor de nitrogênio (%); S: teor de enxofre (%); O: teor de oxigênio (%); PCS: poder calorífico superior (kcal/kg). Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste de Tukey

Observa-se que, para as características químicas elementares, os clones 1277 e 0321 não apresentaram diferença estatística significativa. Também se verifica que os componentes elementares tenderam a reduzir significativamente com o aumento da idade, exceto o teor de oxigênio, porém, este fato não afetou negativamente o poder calorífico superior da madeira. Segundo Huang et al. (2009), para a produção de bioenergia é necessário que a biomassa apresente altos

teores de carbono e hidrogênio, visto que estes constituintes apresentam relação positiva com o poder calorífico superior.

Os valores encontrados no presente trabalho estão coerentes com os encontrados na literatura (BRITO et al., 1983; SILVA; REICHMANN NETO; TOMASELLI, 1983; VALE; BRASIL; LEÃO, 2000).

Na Tabela 4 é apresentado o resultado da análise de variância para a densidade básica média e, no DAP, teores de extrativos totais, lignina, cinzas, holocelulose e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*. Verifica-se que o efeito da interação clone x idade foi significativo para a densidade básica média, densidade básica obtida a 1,30 m de altura do solo (DAP), teores de lignina, holocelulose e a penetração do pino do *Pilodyn*, evidenciando a existência de dependência entre os fatores considerados (clone e idade). Dessa forma, procedeu-se ao seu desdobramento e à avaliação do efeito de clone dentro de idade e da idade dentro de clone. Para o teor de extrativo e cinzas observou-se efeito significativo somente para o fator idade.

Tabela 4 Resumo da análise de variância para as características densidade básica, penetração do pino do *Pilodyn*, e os teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose.

F.V	G.L	Quadrado médio						
		DB _{DAP}	DBm	Ext	Lig	Cz	Holo	Pil
Clone (C)	1	0,002*	0,002*	0,705 ^{ns}	3,240 ^{ns}	0,003 ^{ns}	7,303 ^{ns}	0,001 ^{ns}
Idade (I)	1	0,025*	0,019*	36,602*	67,322*	0,345*	187,074*	9,734*
C x I	1	0,008*	0,012*	0,001 ^{ns}	28,143*	0,001 ^{ns}	28,169*	4,515*
Erro	12	0,001	0,001	0,154	1,772	0,002	1,728	0,575
	Cve	4,77	2,61	8,38	4,59	14,38	1,99	5,70

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CL: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; 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

Observar-se que, de maneira geral, foram encontrados baixos coeficientes de variação experimental, o que demonstra a qualidade do delineamento adotado.

Na Tabela 5 encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de clone dentro da idade e vice-versa, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado para algumas características avaliadas na madeira.

Tabela 5 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características avaliadas na madeira

Variáveis	Idade (meses)	Clones	
		1277	0321
DB _{DAP}	46	0,393 a A	0,465 b A
	58	0,520 a B	0,497 a A
DBm	46	0,396 a A	0,475 b A
	58	0,521 a B	0,490 b A
Lig	46	26,08 a A	27,83 a A
	58	32,83 a B	29,28 b A
Holo	46	69,99 a A	68,69 a A
	58	60,50 a B	64,50 b B
Pil	46	14,62 a A	13,56 a A
	58	12,01 a B	13,06 a A

Pil: penetração do pino do *Pilodyn* (mm); DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito (g/cm³); DBm: densidade básica média (g/cm³); Lig: lignina total (%); 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

A avaliação de efeito da idade dentro de clone mostra que, para o clone 1277, a idade proporcionou diferença estatística significativa para densidade básica média, densidade básica no DAP, teor de lignina, holocelulose e penetração do pino do *pilodyn*, enquanto para o clone 0321 somente o teor de

holocelulose foi significativamente afetado pela idade do material genético. Este resultado indica maior homogeneidade da madeira do clone 0321.

Analisando-se o efeito de clone dentro de cada nível de idade, observou-se que os clones na idade de 46 meses apresentaram diferença estatística significativa somente para as características de DBm e DB_{DAP} , enquanto para a idade de 58 meses os clones apresentaram diferenças significativas para as características de DBm, teor de lignina e holocelulose.

Verificou-se um ganho tanto para DBm como para DB_{DAP} dos clones em estudo da idade de 46 para a idade de 58 meses, tendo sido mais expressivo para o clone 1277, o que é muito importante para fins energéticos na madeira com maiores densidades. Há relatos, na literatura, de que a densidade da madeira tende aumentar com a idade do material até certa idade da árvore (CRUZ, 2000; SILVA et al., 2004). Vale et al. (1995) encontraram valores de densidade básica média variando de 0,504 a 0,521 g/cm³, para *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade, assemelhando-se ao encontrado no presente trabalho, principalmente na idade de 58 meses, para o clone 1277. A maior densidade básica associada ao alto teor de lignina na madeira têm-se uma maior performance desse clone para produção de carvão vegetal.

De modo geral, o teor de lignina total apresentou tendência crescente em relação à idade. 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%, valores estes semelhantes ao encontrado no presente trabalho.

Para o teor de holocelulose, observou-se uma queda com o aumento da idade. Trugilho (1995), ao estudar o efeito da idade em relação à composição química e física do *Eucalyptus saligna*, encontrou relação oposta. 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.

Para a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*, verificou-se que a avaliação do efeito da idade dentro de cada nível de clone foi significativa somente para o clone 1277, enquanto a avaliação do efeito de clones dentro dos níveis de idade foi não significativa para os dois materiais genéticos. Esses resultados estão de acordo com os observados com as densidades básicas da madeira dos clones nas idades em estudo. Este fato se deve à existência de correlação linear negativa entre essas características (VALE et al., 1995). Vale et al. (1995) encontraram valores de penetração do pino do *Pilodyn* variando de 10,0 a 15,0 mm, para *Eucalyptus grandis* aos 8 anos de idade, coerentes com o encontrado no presente trabalho.

Na Tabela 6 encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para o teor de extrativos totais e cinzas na madeira dos clones avaliados.

Tabela 6 Efeito da idade e do clone no teor de extrativos e teor de cinzas da madeira dos clones avaliados

Variáveis	Idade (meses)		Variáveis	Clones	
	46	58		1277	0321
Ext	3,17 a	6,19 b	Ext	4,89 a	4,47 a
Cz	0,52 a	0,23 b	Cz	0,39 a	0,36 a

Ext: teor de extrativos (%); Cz: teor de cinzas (%); Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

Analisando o efeito da idade, observa-se tendência de aumento e redução, respectivamente para o teor de extrativos e cinzas, o que era esperado. Na literatura (MORI et al., 2003; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996) são comumente encontrados baixos valores para o teor de cinzas na madeira de eucalipto (0,07 a 1%), o que é coerente com o observado neste trabalho. Os valores médios de cinzas na madeira estão baixos e próximos, não prejudicando a utilização energética dos clones avaliados.

Analisando o efeito de clone, observou-se que tanto o teor de extrativo como o de cinzas não apresentaram diferença estatística entre as médias dos clones avaliados, porém, o clone 1277 tendeu possuir maiores teores de extrativos e cinzas na madeira.

4.1.1.2 Fazenda Areão

Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se os resumos das análises de variância realizadas para análise química elementar e poder calorífico superior da madeira.

Tabela 7 Resumo da análise de variância realizada para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*

F.V	G.L	Quadrado médio					
		C	H	N	S	O	PCS
Clone (C)	3	0,948 ^{ns}	0,088 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,013 [*]	1,662 ^{ns}	6178 ^{ns}
Idade (I)	1	68,312 [*]	9,143 [*]	0,063 [*]	0,058 [*]	138,905 [*]	2410 ^{ns}
C x I	3	2,926 ^{ns}	0,378 [*]	0,009 [*]	0,028 [*]	6,169 [*]	9854 ^{ns}
Erro	23	1,289	0,038	0,001	0,002	1,822	10172 ^{ns}
	Cve	2,44	3,14	14,59	73,71	2,88	2,22

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; C: carbono; O: oxigênio; S: enxofre; PCS: poder calorífico superior; *: significativo, a 5%, pelo Teste F; ^{ns}: não significativo, a 5%, pelo Teste F

Observa-se, pelos dados da Tabela 7, que a interação clone x idade foi significativa para os teores de hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, evidenciando a existência de dependência entre estes fatores. Dessa forma, realizaram-se seu desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro de idade e idade dentro de clone. Para o teor de carbono, observou-se efeito significativo somente do fator idade, enquanto para o poder calorífico superior não foi observado efeito significativo dos fatores de variação considerados. Observa-se

que somente o coeficiente de variação do teor de enxofre foi alto, semelhante ao encontrado na Fazenda Aliança (CVe=95,07%).

Tabela 8 Resumo da análise de variância para as características densidade básica, penetração do pino do *Pilodyn* e os teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose

F.V	G.L	Quadrado médio						
		DB _{DAP}	DBm	Ext	Lig	Cz	Holo	Pil
Clone (C)	3	0,014*	0,012*	3,566*	8,07*	0,036*	18,550*	39,37*
Idade (I)	1	1,211 ^{ns}	0,009 ^{ns}	0,002 ^{ns}	184,59*	0,180*	174,570*	0,08 ^{ns}
C x I	3	0,001 ^{ns}	0,009 ^{ns}	1,870*	0,811 ^{ns}	0,006*	2,87 ^{ns}	0,92 ^{ns}
Erro	23	0,001	0,008	0,192	1,652	0,001	1,985	0,39
	Cve	3,68	3,46	14,23	4,56	13,5	2,06	4,32

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; CVe: coeficiente de variação experimental (%); P: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; 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

Pelos dados da Tabela 8, observa-se que a interação do efeito de clone x idade foi significativa para os teores de extrativos e cinzas. Para a densidade básica obtida no DAP, a densidade básica média e a penetração do pino do *Pilodyn* ocorreu significância somente para o efeito de clone, enquanto para os teores de lignina e holocelulose obteve significância para o efeito da idade e efeito de clone.

Na Tabela 9 observam-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de clone dentro de cada nível de idade e vice-versa, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado. O efeito significativo da interação indica a existência de dependência entre os fatores clone e idade.

Tabela 9 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características avaliadas na madeira

Variáveis	Idade (meses)	Clones			
		3281	3334	I-144	I-220
Ext	57	2,38 a A	2,39 a A	3,65 b A	3,71 b A
	69	3,84 c B	1,89 a A	3,77 c A	2,86 b B
Cz	57	0,43 c b A	0,45 b A	0,26 a A	0,35 c A
	69	0,29 b B	0,24 c b B	0,15 a B	0,18 c a B
H	57	7,36 b A	6,6 a A	6,61 a A	6,87 a A
	69	5,60 a B	5,73 a B	5,77 a B	5,87 a B
N	57	0,29 b A	0,18 a A	0,22 a A	0,23 a A
	69	0,10 a B	0,16 b A	0,11 a b B	0,16 b B
S	57	0,26 c A	0,02 a A	0,06 a b A	0,13 b A
	69	0,00 a B	0,04 a A	0,00 a A	0,05 a B
O	57	42,62 a A	45,63 b A	45,55 b A	44,72 a b A
	69	49,41 a B	49,54 a B	48,27 a B	48,77 a B

Ext: teor de extrativos totais (%); Cz: teor de cinzas (%); H: hidrogênio (%); N: nitrogênio (%); S: enxofre (%); O: oxigênio (%). 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

De modo geral, os valores médios observados para os teores de extrativos, cinzas, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio estão de acordo com os encontrados na literatura (TRUGILHO et al., 2001).

A avaliação de efeito da idade dentro de cada nível de clone mostra que, para os clones 3281 e I-220, ocorreu diferença estatística significativa para os teores de extrativos, cinzas, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio. Já para o clone 3334, a idade proporcionou diferença estatística somente para os teores de cinzas, hidrogênio e oxigênio, enquanto para o clone I-144, diferença significativa ocorreu para os teores de cinzas, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio na madeira.

Analisando-se o efeito de clone dentro de cada nível de idade, observou-se que os clones na idade de 57 meses apresentaram diferença estatística

significativa para os teores de extrativos, cinzas, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, enquanto para os 69 meses de idade, verificou-se que os clones somente apresentaram diferenças significativas para os teores de extrativos, cinzas e nitrogênio.

De modo geral, observou-se, nos clones em estudo, queda do teores de cinzas, hidrogênio, nitrogênio e enxofre em função do aumento da idade. Segundo relatos na literatura, quanto maior a proporção de minerais na madeira, maior será a percentagem de cinzas no carvão, fato este indesejável, constituindo problema grave que pode ser limitante na siderurgia. Trugilho (1995) relata que há uma tendência de estabilização deste teores com o aumento da idade, o que é coerente com o presente estudo. Já o teor de oxigênio apresentou um aumento com a idade, para todos os clones, o que não é interessante, pelo fato de este constituinte apresentar relação linear negativa com o poder calorífico (HUANG et al., 2009; NORDIN, 1994).

Os menores teores de minerais foram observados na madeira dos clones I-144 e I-220, nas duas idades consideradas.

Para a produção de bioenergia, é desejável que a madeira apresente altos teores de hidrogênio e baixos teores de oxigênio, devido às correlações existentes entre esses componentes elementares e o poder calorífico.

Na Tabela 10 encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para densidades básicas, teor de lignina, profundidade de penetração do pino do pilodyn e poder calorífico superior da madeira dos clones avaliados.

Analisando-se o efeito da idade, observa-se que somente os teores de lignina, holocelulose e carbono apresentaram diferença estatística. Os teores de holocelulose e carbono apresentaram tendência de queda com o aumento da idade. Balbinot et al. (2008) verificaram também um aumento do teor de carbono com o aumento da idade. O teor de lignina obteve um acréscimo com o

aumento da idade, visto que a lignina tem relação inversa com o teor de holocelulose.

Tabela 10 Efeito da idade e do clone nas características da madeira dos clones avaliados

Variáveis	Idade (meses)		Variáveis	Clones			
	57	69		3281	3334	I-144	I-220
DB _{DAP}	0,457 a	0,456 a	DB _{DAP}	0,397 a	0,450 b	0,470 b	0,502 c
DBm	0,458 a	0,462 a	DBm	0,406 a	0,448 b	0,476 c	0,504 d
Lig	25,68 b	30,56 a	Lig	29,16 a	27,48 a b	29,18 a	27,09 b
Pil	14,51 a	14,62 a	Pil	17,61 a	15,35 b	12,97 c	12,70 c
PCS	4555 a	4537 a	PCS	4569 a	4531 a	4514 a	4572 a
Holo	70,86 b	66,11 a	Holo	67,26 a	70,02 b	66,88 a	69,34 b
C	48,05 b	45,08 a	C	46,83 a	46,03 a	46,68 a	46,57 a

DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito (g/cm³); DBm: densidade básica média (g/cm³); Lig: lignina total (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn* (mm); Holo: teor de holocelulose (%); C: carbono (%); PCS: poder calorífico superior (kcal/kg); Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

De modo geral, os valores de densidade básica encontrados no presente estudo estão de acordo com os relatados por Queiroz et al. (2004), que verificaram valor médio de 0,447g/cm³ para cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* aos 6 anos de idade, enquanto Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005) encontraram valor médio de 0,490 g/cm³ aos 8 anos de idade.

Analisando-se o efeito de clone nas variáveis analisadas, observou-se que a densidade básica média obtida no DAP, os teores de lignina, a holocelulose e a profundidade de penetração do pino *Pilodyn* apresentaram diferença estatística. O clone I-220 apresentou maiores valores de densidade básica, o que proporciona melhor desempenho para a produção de carvão vegetal, como há relatos na literatura (TRUGILHO, 1995). Este mesmo material apresentou menores valores de penetração do pino do *Pilodyn*, o que era

esperado, pois este aparelho apresenta relação inversa com a densidade básica (GOUVÊA et al., 2011).

Para teor de carbono e poder calorífico superior da madeira os clones não apresentaram diferença estatística. O teor de carbono e o poder calorífico superior foram, aproximadamente, de 46% e 4.500 cal/g, respectivamente. Estes valores estão dentro da faixa normalmente encontrada para a madeira de folhosas.

4.1.1.3 Fazenda Brejos

Nas Tabelas 11 e 12 encontra-se o resumo da análise de variância realizada para as características avaliadas na madeira. Pelos dados da Tabela 11, observa-se que a interação do efeito de clone x idade foi significativa somente para o teor de enxofre, evidenciando a existência de dependência entre os fatores considerados. Dessa forma, realizaram-se seu desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro de idade e idade dentro de clone. Para os teores de hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e poder calorífico superior observou-se efeito significativo somente para o fator idade, enquanto para o teor de carbono observou-se efeito significativo para o fator idade e clone. Observaram-se baixos coeficientes de variação experimentais, porém, o teor de enxofre apresentou alta variação, como ocorreu nas fazendas anteriormente estudadas.

Tabela 11 Resumo da análise de variância realizada para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*

F.V	G.L	Quadrado médio					
		C	H	N	S	O	PCS
Clone (C)	1	2,958*	0,005 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,001*	2,472 ^{ns}	3393,06 ^{ns}
Idade (I)	1	8,236*	1,509*	0,015*	0,004*	18,425*	25840,56*
C x I	1	0,090 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,010*	0,018 ^{ns}	18,06 ^{ns}
Erro	12	0,478	0,008	0,001	0,001	0,628	3989,85
	Cve	1,48	1,48	13,74	33,24	1,70	1,37

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; C: carbono; O: oxigênio; S: enxofre; PCS: poder calorífico superior; *: significativo, a 5%, pelo Teste F; ^{ns}: não significativo, a 5%, pelo Teste F

Tabela 12 Resumo da análise de variância para as características densidade básica, penetração do pino do *Pilodyn* e teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose

F.V	G.L	Quadrado médio						
		DB _{DAP}	DBm	Ext	Lig	Cz	Holo	Pil
Clone (C)	1	0,011*	0,018*	0,814 ^{ns}	5,25 ^{ns}	0,001 ^{ns}	1,822 ^{ns}	26,26*
Idade (I)	1	0,001 ^{ns}	0,001*	0,493 ^{ns}	29,671*	0,055*	34,981*	16,52*
C x I	1	0,001 ^{ns}	0,001 ^{ns}	1,995*	0,41 ^{ns}	0,036*	0,331 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Erro	12	0,002	0,001	0,359	1,37	0,001	1,322	1,12
	Cve	4,68	3,3	16,76	4,41	12,63	1,66	7,44

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; 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

Na Tabela 12, o efeito da interação do efeito de clone x idade foi significativo para os teores de cinzas e extrativos. Assim, foi realizado o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro de idade e idade dentro de clone. Para a penetração do pino do *Pilodyn* e para a densidade básica média,

observou-se efeito significativo de clone e idade. Para o teor de lignina e holocelulose, somente o efeito de idade foi significativo, enquanto para a densidade básica no DAP, apresentou significância somente para o efeito de clone.

Na Tabela 13 encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de clone dentro de idade e vice-versa, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado para os teores de extrativos totais, cinzas e enxofre.

A avaliação de efeito da idade dentro de clone mostrou que, para o clone I-144, ocorreu diferença estatística significativa para os teores de extrativos e cinzas, enquanto para o clone I-220 somente o teor de enxofre foi significativamente afetado pela idade do material genético.

Tabela 13 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características avaliadas na madeira

Variáveis	Idade (meses)	Clone	
		I-144	I-220
Ext	49	2,82 a A	3,98 b A
	61	3,88 a B	3,62 a A
Cz	49	0,43 a A	0,35 b A
	61	0,22 a B	0,33 b A
S	49	0,02 a A	0,09 b A
	61	0,04 a A	0,01 b B

Ext: teor de extrativos totais (%); Cz: teor de cinzas (%); S: enxofre (%). 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

Segundo relatos na literatura, com o aumento da idade, tende-se a ter maiores valores no teor de extrativos devido ao processo de cernificação (RAYMOND, 2000). É desejável que a madeira apresente baixo teor de cinzas, como evidenciado na idade de 61 meses, pelo fato de este constituinte ser

indesejável para a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico e energia de modo geral (BRAND, 2010).

Analisando-se o efeito de clone dentro de cada nível de idade, observou-se que os clones na idade de 49 meses apresentaram diferença estatística significativa para os teores de extrativos, cinzas e enxofre. Entretanto, para a idade de 61 meses, somente o teor de extrativos não apresentou diferença estatística, entre os clones avaliados. De modo geral, os teores de extrativos, cinzas e enxofre apresentaram tendência de queda com o aumento da idade, coerente com o trabalho de Andrade (2006) que observou uma redução na quantidade de material inorgânico com o aumento da idade. É interessante que a madeira apresente baixos valores de enxofre, visto que há relatos, na literatura, de que este composto é tanto prejudicial à saúde humana quando liberado na atmosfera, como também é indesejável para fins energéticos (BRAND, 2010; MUNALULA; MEINCKEN, 2009; OBERNBERGER; BRUNNER; BARNTHALER, 2006).

Na Tabela 14 encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para as densidades básicas, teores de lignina, holocelulose, carbono, hidrogênio e oxigênio, profundidade de penetração do pino do pilodyn e poder calorífico superior.

Tabela 14 Efeito da idade e do clone nas características da madeira dos clones avaliados

Variáveis	Idade (meses)		Variáveis	Clones	
	49	61		I-144	I-220
DB _{DAP}	0,469 a	0,457 a	DB _{DAP}	0,433 a	0,492 b
DBm	0,468 a	0,447 b	DBm	0,423 a	0,492 b
Lig	25,26 a	27,99 b	Lig	27,20 a	26,05 a
Holo	70,93 a	67,97 b	Holo	69,11 a	69,79 a
Pil	13,21 a	15,25 b	Pil	15,51 a	12,95 b
C	47,48 a	46,05 b	C	47,19 a	46,33 a
H	6,71 a	6,10 b	H	6,39 a	6,42 a
N	0,21 a	0,15 b	N	0,17 a	0,19 a
O	45,52 a	47,66 b	O	46,20 a	46,98 a
PCS	4654 a	4574 b	PCS	4629 a	4600 a

DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito (g/cm³); DBm: densidade básica média (g/cm³); Lig: lignina total (%); Holo: teor de holocelulose (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn* (mm); C: carbono (%); H: hidrogênio (%); N: nitrogênio (%); S: enxofre (%); O: oxigênio (%). PCS: poder calorífico superior (kcal/kg); Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

Analisando-se o efeito da idade, observa-se que somente a densidade obtida no DAP não apresentou efeito significativo em relação às idades consideradas.

Observa-se que as densidades básicas, média e no DAP apresentaram uma redução com o aumento da idade, sendo confirmada pela relação inversa encontrada na profundidade de penetração do pino do *pilodyn*. Segundo relatos na literatura, a densidade básica tende a aumentar com a idade do material (SILVA et al., 2004; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; VITAL, 1984), resultado não encontrado no presente trabalho. Este fato pode ser explicado pela pelo início da estabilização desta característica ou, mesmo, pela intensidade amostral.

Para o teor de lignina, observou-se um acréscimo com o aumento da idade, o que é bem interessante, do ponto de vista energético. Madeiras que têm

maiores teores de lignina são indicadas para a seleção clonal de *Eucalyptus*, visando à produção de bioenergia (DEMIRBAS, 2001). Os teores de holocelulose evidenciaram queda com o aumento da idade, visto que este constituinte apresenta relação inversa com o teor de lignina. Todavia, os valores de holocelulose estão coerentes com os encontrados no trabalho de Trugilho (1995).

Para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e poder calorífico superior, observou-se redução dos mesmos com o aumento da idade. Estes valores são semelhantes aos encontrados por Arantes (2009), que estudou um clone de *Eucalyptus* aos oito anos de idade. Para a produção de carvão vegetal, é interessante que a madeira apresente altos teores de carbono e hidrogênio, visto que estes compostos contribuem positivamente para um maior poder calorífico e apresentem baixos teores de oxigênio e nitrogênio (KUMAR et al., 2010; SENELWA; SIMS, 1999).

Analisando-se o efeito de clone, observa-se que as densidades básicas, média e a obtida no DAP, e a penetração do pino do *Pilodyn* apresentaram significância entre os materiais genéticos em estudo. O clone I-220 apresentou maiores valores médios para a DB_{DAP} e DB_m , o que pode ser comprovado pela menor profundidade de penetração do pino do *pilodyn*, estando coerente com o relatado por Vale et al. (1995). Este clone, mesmo apresentando menor teor de lignina, apresenta grande potencialidade para a produção de carvão vegetal.

4.1.1.4 Fazenda Ponte

Nas Tabelas 15 e 16 encontra-se o resumo da análise de variância realizada para a característica avaliada na madeira. Pelos dados da Tabela 15, observa-se que a interação clone x idade só foi significativa para os teores de nitrogênio e enxofre, evidenciando a existência de dependência entre os fatores

considerados (clone e idade). Assim, procederam-se ao seu desdobramento e à avaliação do efeito de clone dentro de idade e idade dentro de clone. Para os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio, observaram-se efeito significativo somente para o fator idade. Para o poder calorífico, observou-se significância somente para o efeito de clone. Em geral, os coeficientes de variação experimental se mostraram baixos, exceto para os constituintes nitrogênio e enxofre, visto, também, que estes compostos são encontrados na biomassa em baixas quantidades.

Tabela 15 Resumo da análise de variância realizada para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e o poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*

F.V	G.L	Quadrado médio					
		C	H	N	S	O	PCS
Clone (C)	3	0,263 ^{ns}	0,040 ^{ns}	0,004 ^{ns}	0,001*	0,637 ^{ns}	20585*
Idade (I)	1	53,251*	5,927*	0,006 ^{ns}	0,001 ^{ns}	96,223*	4278 ^{ns}
C x I	3	3,249 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,009*	0,002*	3,010 ^{ns}	11054 ^{ns}
Erro	24	1,282	0,028	0,002	0,001	1,715	5037
	Cve	2,43	2,71	29,59	53,53	2,79	1,55

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; C: carbono; O: oxigênio; S: enxofre; PCS: poder calorífico superior; *: significativo, a 5%, pelo Teste F; ^{ns}: não significativo, a 5%, pelo Teste F

Tabela 16 Resumo da análise de variância para as características densidade básica, penetração do pino do *Pilodyn*, e os teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose

F.V	G.L	Quadrado médio						
		DB _{DAP}	DBm	Ext	Lig	Cz	Holo	Pil
Clone (C)	3	0,004*	0,003*	0,778*	7,537*	0,065*	4,552 ^{ns}	7,81*
Idade (I)	1	0,001 ^{ns}	0,001 ^{ns}	1,781*	7,925*	0,222*	95,427*	0,02 ^{ns}
C x I	3	0,003*	0,002*	0,595 ^{ns}	5,879 ^{ns}	0,002 ^{ns}	8,859*	4,55*
Erro	24	0,001	0,002	0,207	2,347	0,001	2,889	1,27
	Cve	5,09	4,40	13,75	5,57	11,60	2,47	7,71

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; C: clone; I: idade; C x I: interação clone x idade; Cve: coeficiente de variação experimental (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; 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

Observa-se, pelos dados da Tabela 16, que a interação clone x idade foi significativa para densidade básica obtida no DAP, densidade média, teor de holocelulose e penetração do pino do *Pilodyn*, o que evidencia a existência de dependência entre os fatores considerados (clone e idade). Dessa forma, realizou-se o seu desdobramento para avaliação do efeito de clone dentro de idade e vice-versa. Para os teores de lignina total, extrativos e cinzas, observou-se a significância dos efeitos de clone e idade. Os coeficientes de variação experimental se mostraram baixos, o que indica a performance do delineamento experimental adotado.

Na Tabela 17 encontram-se os valores médios, considerando os desdobramentos da interação e avaliação do efeito de clone dentro de idade e vice-versa, com o respectivo teste de comparação múltipla realizado.

Tabela 17 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características avaliadas na madeira

Variáveis	Idade (meses)	Clones			
		3335	I-144	I-220	3334
DB _{DAP}	55	0,424 a A	0,439 a A	0,453 a b A	0,497 b A
	67	0,473 b B	0,412 a A	0,473 b A	0,4611 b B
DBm	55	0,427 a A	0,428 a A	0,455 a b A	0,487 b A
	67	0,465 b B	0,418 a A	0,479 b A	0,453 a b B
Holo	55	68,86 a A	71,40 a A	70,30 a A	71,79 a A
	67	68,18 a A	68,28 a B	65,86 a B	66,21 a B
Pil	55	16,68 b A	14,50 a b A	13,75 a A	13,87 a A
	67	14,69 a b B	16,18 b B	13,69 a A	14,00 a b A
N	55	0,18 a A	0,21 a A	0,21 a A	0,19 a A
	67	0,24 b A	0,17 a b A	0,11 a B	0,15 a b A
S	55	0,03 a A	0,04 a A	0,02 a A	0,01 a A
	67	0,06 b B	0,00 a B	0,03 a b A	0,03 b A

DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito (g/cm³); DBm: densidade básica média (g/cm³); Holo: teor de holocelulose (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn* (mm); N: nitrogênio (%); S: enxofre (%); Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

Analisando-se o efeito da idade dentro de cada nível de clone, verifica-se que, para o clone 3335, houve diferença significativa para a densidade básica obtida no DAP, a densidade básica média, o teor de enxofre e a profundidade de penetração do pino do *pilodyn*. O clone I-144 apresentou significância para os teores de holocelulose, enxofre e profundidade de penetração do pino do *pilodyn*; o clone I-220, para os teores de holocelulose e nitrogênio e o clone 3334, para a densidade básica obtida no DAP, a densidade básica média e o teor de holocelulose.

De modo geral, os clones 3335 e o I-220 apresentaram tendência de aumento da densidade básica com aumento com a idade do material genético, fato não observado para os clones I-144 e 3334. Para produção de carvão

vegetal, maiores densidades básicas são de interesse, uma vez que a densidade básica está relacionada com a produção de massa seca.

Valores para a profundidade de penetração do pino *Pilodyn* estão associados inversamente com valores de densidade básica, ou seja, maiores valores de densidade básica apresentam menores valores da penetração do pino de *Pilodyn*, como evidenciado nos clones I-220 e 3335 nas idades em estudo. Este fato não foi observado nos clones I-144 e 3334. Os valores dessa característica foram semelhantes ao encontrado por Gouvêa et al. (2011).

Observa-se que os teores de enxofre e nitrogênio apresentaram baixas quantidades nos clones analisados e tendência de diminuição com a idade, assemelhando-se aos resultados encontrados no trabalho de Santana (2009). Segundo relatos na literatura, é desejável que a biomassa apresente baixas quantidades desses constituintes elementares, pois estes resultam em poluição ambiental, como a formação de óxidos de nitrogênio tóxicos após a combustão (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; KUMAR et al., 2010) e não apresenta correlação positiva com o poder calorífico (HUANG et al., 2009).

Analisando-se o efeito de clone dentro de cada nível de idade, observou-se que os clones na idade de 55 meses apresentaram diferença estatística significativa somente para as densidades básicas, média e a obtida no DAP, e a profundidade de penetração do pino do *pilodyn*. Para 67 meses de idade, verificou-se que os clones somente não apresentaram diferenças significativas para o teor de holocelulose.

O clone I-144 se caracterizou pelos baixos valores de densidade básica da madeira, enquanto o I-220 apresentou maior valor de densidade básica média na idade de 67 meses, estando relacionado ao maior e menor valor de profundidade de penetração do pino do *pilodyn*, respectivamente. Este resultado indica a eficiência do *pilodyn* na separação e na avaliação indireta da densidade básica da madeira.

De modo geral, os clones em estudo apresentaram tendência de decréscimo no teor de holocelulose com o aumento da idade. Silva et al. (2005) e Trugilho, Lima e Mendes (1996) encontraram o mesmo comportamento para os teores de holocelulose. Estes mesmo autores observaram, ainda, teores de holocelulose variando entre 68,52% e 72,47% e 67,11% e 70,61%, respectivamente.

Na Tabela 18 encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para os teores de extrativos totais, lignina, cinzas, carbono, hidrogênio e oxigênio elementar e poder calorífico superior.

Tabela 18 Efeito da idade e do clone nas características da madeira dos clones avaliados

Variáveis	Idade (meses)		Variáveis	Clones			
	55	67		3335	I-144	I-220	3334
Ext	3,08 a	3,55 b	Ext	2,97 a	3,65 b	3,14 a b	3,48 a b
Lig	25,94 a	29,09 b	Lig	28,08 a b	26,27 a	28,46 b	27,26 a b
Cz	0,38 a	0,21 b	Cz	0,42 c	0,22 a	0,30 b	0,24 a
C	47,84 a	45,26 b	C	46,82 a	46,46 a	46,44 a	46,47 a
H	6,64 a	5,78 a	H	6,32 a	6,17 a	6,17 a	6,19 a
O	45,28 a	48,74 b	O	46,59 a	47,14 a	47,18 a	47,59 a
PCS	4564 a	4587 a	PCS	4511 a	4633 b	4588 a b	4570 a b

Ext: teor de extrativos totais (%); Lig: lignina total (%); Cz: teor de cinzas (%); C: carbono (%); H: hidrogênio (%); O: oxigênio (%); PCS: poder calorífico superior (kcal/kg). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

Analisando-se o efeito da idade, verifica-se que o teor de hidrogênio e o poder calorífico superior não apresentaram diferença estatística significativa. Segundo relatos na literatura, altos teores de hidrogênio contribuem significativamente para o valor calórico (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004). Entretanto, os teores de extrativos, lignina, cinzas, carbono e oxigênio apresentaram diferença estatística entre as duas idades avaliadas. Os teores de

extrativo, lignina e oxigênio apresentaram tendência de aumento com o aumento da idade.

Os teores de cinzas e carbono evidenciaram tendência de queda em função da idade do material. Para o teor de cinzas, o resultado é de interesse, uma vez que a presença de elevados valores pode ser indesejável para a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico. Observa-se que os valores médios de cinzas na madeira foram baixos e não dificultaram a utilização energética dos clones avaliados. Entretanto, baixos teores de carbono não são interessantes, visto que este constituinte tem correlação positiva com o poder calorífico da madeira. Apesar da redução do teor de carbono, o poder calorífico não foi afetado significativamente.

Analisando-se o efeito de clone, observa-se que os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio não apresentaram diferença estatística entre as médias nos clones avaliados. Já o teor de extrativos, lignina, cinzas e poder calorífico superior apresentou diferença entre as médias dos clones.

Observa-se que o clone I-144 apresentou maiores valores no teor de extrativos e também para o poder calorífico da madeira. Já para o teor de lignina, o clone I-220 apresentou maior teor quando comparado aos demais, fazendo com que este material apresente tendência a apresentar melhor desempenho para a produção de bioenergia (BRAND, 2010). Os minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa, sendo indesejáveis para a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico (BRAND, 2010).

Segundo Andrade (1993), é desejável que a madeira apresente baixos teores de cinza quando o foco é produção de carvão vegetal, visto que este constituinte não participa do processo de combustão da biomassa. O clone que apresentou menor teor foi o I-144.

4.1.2 Características avaliadas no carvão vegetal

Na Tabela 19 encontram-se os valores médios referentes à densidade relativa aparente, poder calorífico superior e rendimentos no carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus* nas fazendas Aliança, Brejos, Areão e Ponte, considerando as duas idades.

Tabela 19 Valores médios de densidade relativa aparente, poder calorífico superior e rendimentos avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, considerando as duas idades

Local	Clone	Idade (meses)	DRA	RG	RLP	RGNC	PCS
AL	0321	46	341	31,66	47,30	21,04	8017
		58	398	31,55	38,02	30,43	7669
	1277	46	397	31,44	46,59	21,97	7672
		58	403	32,16	42,43	25,40	7621
AR	I-144	57	363	30,93	47,07	22,00	7559
		69	348	31,88	44,56	23,55	7626
	I-220	57	435	29,05	46,87	24,07	7583
		69	374	30,90	32,81	36,29	7649
	3281	57	382	29,92	48,57	21,51	7718
		69	309	30,26	46,78	22,96	7631
	3334	57	423	28,02	47,45	24,53	7435
		69	331	30,54	44,96	24,50	7655
BR	I-144	49	344	30,16	46,11	23,73	7739
		61	360	31,22	43,24	25,55	7726
	I-220	49	323	29,90	49,36	20,73	7478
		61	411	29,18	42,61	28,20	7785
PO	I-144	55	348	30,54	45,17	24,29	7735
		67	320	32,47	32,51	35,03	7673
	I-220	55	348	30,21	47,42	22,37	7837
		67	376	32,11	46,60	21,28	7625
	3334	55	400	29,07	38,90	32,03	7551
		67	311	31,65	46,00	22,35	7698
	3335	55	325	30,56	46,84	22,61	7526
		67	380	29,85	41,24	28,91	7851
Média			365	30,64	44,14	25,22	7669
CV (%)			5,73	2,78	6,24	10,62	1,02

AL, AR, BR, PO: Fazendas Aliança, Areão, Brejos e Ponte; RG, RLP, RGNC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%), em líquido pirolenhoso (%), em gases não condensáveis (%), respectivamente; PCS: poder calorífico superior (kcal/kg); DRA: densidade relativa aparente (kg/m³); CV (%): coeficiente de variação amostral, entre clones

Observaram-se, de maneira geral, baixos coeficientes de variação entre os clones para densidade relativa aparente, poder calorífico superior e rendimentos avaliados no carvão vegetal produzido a partir da madeira dos clones de *Eucalyptus* avaliados nas idades consideradas.

Analisando-se o efeito da densidade relativa aparente, observa-se que, em média, os clones cultivados na Fazenda Aliança, Brejo e Ponte tiveram um aumento da densidade relativa aparente do carvão em relação à idade. Isso pode ser vantajoso, pois maximiza a densidade energética do carvão, ou seja, ocorre um aumento na quantidade de energia por unidade de volume de carvão. Entretanto, os clones cultivados na Fazenda Areão apresentaram um comportamento contrário, evidenciando ligeira queda da densidade relativa aparente, fato este que pode ser explicado pelo local de cultivo.

Botrel et al. (2007) encontraram densidade relativa aparente do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* variando de 280 a 402 kg/m³. Observam-se, ainda, valores similares para o PCS do carvão vegetal dos diferentes clones nas quatro localidades, sendo observada uma baixa variação nos locais de cultivo e entre as idades. Isso é um indicativo de que tanto os locais quanto os clones e a idade avaliados não influenciaram de maneira significativa nessa característica, evidenciando a grande potencialidade energética desses materiais genéticos. No entanto, Lima, Silva e Lavoranti (2011) encontraram valores para o PCS do carvão vegetal de *Eucalyptus bethamii* superiores aos encontrados neste trabalho.

Observa-se que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal apresentou baixa variação, tanto entre os clones nas fazendas analisadas quanto nas idades consideradas. Os valores médios entre as fazendas foram bastante próximos para a produção de carvão vegetal, sendo desejável que apresente elevado rendimento gravimétrico. Segundo dados encontrados na literatura, em média, 35% do rendimento em carvão vegetal, no Brasil, são advindos de clones de *Eucalyptus*

(BOTREL et al., 2007; ROSILLO-CALLE et al., 2005), diferindo em aproximadamente 4,46 % da média geral dos clones de *Eucalyptus* na fazenda em questão. Possivelmente, a idade e a composição química da madeira influenciaram esse resultado.

Quanto ao rendimento em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, ele é proporcional ao rendimento gravimétrico. Trugilho et al. (2001, 2005) encontraram valores inferiores, sendo esse resultado 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 neste trabalho como agente redutor e térmico nas aplicações industriais, como o ferro-gusa, o aço e o cimento (ROSILO-CALLE et al., 2005).

Na Tabela 20 encontram-se os valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Aliança, Brejos, Areão e Ponte, considerando as duas idades.

Tabela 20 Valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, considerando as duas idades

Local	Clone	Idade (meses)	TMV	TCZ	TCF
AL	0321	46	21,71	1,25	77,03
		58	18,46	0,87	80,67
	1277	46	20,02	1,55	78,55
		58	20,53	0,69	78,78
AR	I-144	57	20,48	0,75	78,84
		69	19,10	0,73	80,17
	I-220	57	20,29	0,84	78,88
		69	18,28	0,78	80,95
	3281	57	19,47	1,14	79,36
		69	18,30	0,99	80,71
	3334	57	18,04	1,12	80,92
		69	19,38	0,88	79,74
BR	I-144	49	17,70	1,09	81,22
		61	18,11	0,95	80,94
	I-220	49	19,56	0,85	79,60
		61	14,88	0,80	84,32
PO	I-144	55	19,92	0,91	79,20
		67	20,26	0,55	79,19
	I-220	55	22,17	0,82	76,94
		67	18,00	0,69	81,32
	3334	55	15,88	0,89	83,22
		67	20,03	0,72	79,26
3335	55	17,58	1,30	80,81	
	67	16,50	0,92	82,58	
Média			18,94	0,92	80,13
CV (%)			6,22	16,8	1,41

AL, AR, BR, PO: Fazenda Aliança, Areão, Brejos e Ponte; TCF, TMV, TCZ: teor de carbono fixo (%), de materiais voláteis (%) e de cinzas (%), respectivamente; CV (%): coeficiente de variação amostral entre clones

De modo geral, observaram-se baixos coeficientes de variação entre os clones e entre as médias nas idades avaliadas para teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo.

Para o teor de cinzas, 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., 2001, 2005), coerentes com o encontrado neste trabalho.

Segundo dados disponíveis na literatura, os combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a queimar-se mais lentamente, ou seja, eles poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para queima total, quando comparados com combustíveis que possuam baixo índice de carbono fixo (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 grande potencial para o seu uso siderúrgico. Segundos relatos encontrados na literatura, o carvão vegetal usado na fabricação de aço e ferro-gusa deve ter um teor de carbono fixo superior a 75% (ROSILLO-CALLE et al., 2005). Botrel et al. (2007) e Trugilho et al. (2005) encontraram teor de carbono fixo inferior ao encontrado no presente trabalho para diferentes clones de *Eucalyptus*. Os clones 3334, I-144 e I-220 apresentaram altos teores de carbono fixo, mostrando, assim, a grande potencialidade energética e industrial do carvão vegetal proveniente destes materiais.

O teor médio de materiais voláteis que Botrel et al. (2007) encontraram para diferentes clones de *Eucalyptus* foi de 25,50%, superior ao encontrado neste trabalho.

Na Tabela 21, encontram-se os valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Aliança, Brejos, Areão e Ponte, considerando as duas idades.

Tabela 21 Valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* considerando as duas idades.

Local	Clone	Idade (meses)	C	H	N	S	O
AL	0321	46	85,97	2,98	0,24	0,18	10,62
		58	75,49	2,84	0,24	0,00	21,42
	1277	46	78,25	3,45	0,21	0,41	17,66
		58	77,89	2,94	0,27	0,00	18,89
AR	I-144	57	79,03	3,44	0,21	0,36	16,95
		69	76,21	2,97	0,22	0,01	20,57
	I-220	57	76,82	3,32	0,22	0,17	19,46
		69	77,91	2,91	0,19	0,00	18,97
	3281	57	81,62	3,39	0,20	0,17	14,60
		69	80,32	3,08	0,28	0,00	16,31
	3334	57	79,48	3,36	0,24	0,27	16,64
		69	77,49	2,96	0,19	0,00	19,35
BR	I-144	49	81,05	3,30	0,19	0,20	15,24
		61	76,11	2,90	0,21	0,00	20,77
	I-220	49	81,12	3,35	0,21	0,24	15,06
		61	77,27	2,67	0,17	0,00	19,88
PO	I-144	55	81,11	3,23	0,26	0,14	15,25
		67	81,97	2,05	0,15	0,01	15,81
	I-220	55	85,01	3,08	0,21	0,40	11,28
		67	78,84	3,01	0,20	0,00	17,94
	3334	55	75,86	3,38	0,22	0,32	20,21
		67	77,01	2,67	0,22	0,00	20,09
	3335	55	81,83	3,20	0,20	0,23	14,52
		67	75,81	2,93	0,22	0,01	21,02
	Média		79,14	3,06	0,22	0,13	17,44
	CV (%)		2,23	5,32	8,32	36,68	9,66

AL, AR, BR, PO: Fazenda Aliança, Areão, Brejos e Ponte; C, H, N, S, O (%): Teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio; CV (%): coeficiente de variação amostral, entre clones

Observa-se que o coeficiente de variação entre os clones avaliados mostrou-se baixos, somente para o teor de enxofre observou uma alta variação, indicando a existência de variabilidade entre os materiais genéticos, o que permite a seleção dos mesmos. Nas fazendas em estudo, os clones apresentaram

baixa variação dos valores médios em relação à idade, observando-se ligeira queda do teor do carbono elementar nos clones avaliados nas idades em estudos, mas este fato não o prejudica a utilização na siderurgia.

Oliveira et al. (2010), ao analisarem as propriedades químicas do carvão vegetal produzido a partir de clones de *Eucalyptus pellita* aos 5 anos de idade, encontraram 76,92% de carbono, 2,63% de hidrogênio, 0,41% de nitrogênio e 20,04% de oxigênio, valores estes coerentes ao presente trabalho.

Oliveira et al. (2010) relatam que os seus teores dependem da espécie, da adubação e do sítio de plantio. Os valores de enxofre obtidos neste trabalho estão de acordo com os aceitáveis pela siderurgia, todos abaixo de 0,5%.

4.2 Avaliação do efeito de clone e local

4.2.1 Primeira avaliação (56 meses)

4.2.1.1 Características avaliadas na madeira

Nas Tabelas 22 e 23 encontram-se o resumo da análise de variância realizada para a característica avaliada na madeira. Pela Tabela 22, observa-se que a interação clone x local só foi significativa para a densidade básica, teores de lignina e cinzas e penetração do pino do *Pilodyn*. Assim, procederam-se ao seu desdobramento e à avaliação do efeito de clone dentro de local e local dentro de clone. O teor de extrativos totais foi significativo somente para o efeito de clone. Já o teor de holocelulose não apresentou diferença estatística significativa. Em geral, os coeficientes de variação experimental podem ser considerados baixos.

Tabela 22 Resumo da análise de variância para as características densidade básica, penetração do pino do *Pilodyn*, e os teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose

F.V	G.L	Quadrado médio						
		DB _{DAP}	DBm	Ext	Lig	Cz	Holo	Pil
Local (L)	1	0,001 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,068 ^{ns}	0,493 ^{ns}	0,000 ^{ns}	1,053 ^{ns}	1,14 ^{ns}
Clone (CL)	2	0,001 ^{ns}	0,001 ^{ns}	2,162*	1,226 ^{ns}	0,022*	5,912 ^{ns}	5,59*
L x CL	2	0,006*	0,005*	0,717 ^{ns}	8,256*	0,014*	6,151 ^{ns}	7,33*
Erro	18	0,001	0,000	0,240	2,016	0,001	2,392	0,68
	CVe	4,82	3,93	15,32	5,57	9,60	2,18	5,99

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CL: clone; L: local; L x CL: interação local x clone; CVe: coeficiente de variação experimental (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; 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 23 Resumo da análise de variância realizada para os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e poder calorífico superior da madeira dos clones de *Eucalyptus*

F.V	G.L	Quadrado médio					
		C	H	N	S	O	PCS
Local (L)	1	0,288 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,000 ^{ns}	0,0122*	0,784 ^{ns}	4510 ^{ns}
Clone (CL)	2	0,857 ^{ns}	0,042 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,007 ^{ns}	1,370 ^{ns}	9415 ^{ns}
L x CL	2	0,246 ^{ns}	0,052 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,006 ^{ns}	0,421 ^{ns}	1319 ^{ns}
Erro	18	0,497	0,029	0,006	0,002	0,774	2792
	CVe	1,48	2,59	12,49	88,51	1,93	1,16

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; CL: clone; L: local; L x CL: interação local x clone; CVe: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; H: hidrogênio; C: carbono; O: oxigênio; S: enxofre; PCS: poder calorífico superior; *: significativo, a 5%, pelo Teste F; ^{ns}: não significativo, a 5%, pelo Teste F

Observa-se na Tabela 23, que os efeitos de local e clone foram não significativos para os teores químicos elementares e poder calorífico superior da madeira. O teor de enxofre apresentou efeito de local significativo.

Na Tabela 24 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 as densidades básicas, teores de lignina, cinzas e penetração do pino do *Pilodyn*.

Tabela 24 Valores médios e teste de comparação múltipla, realizado para as características avaliadas na madeira

Variáveis	Fazenda	Clone		
		3334	I-220	I-144
DB _{DAP}	Areão	0,445 a A	0,500 b A	0,475 a b A
	Ponte	0,497 b B	0,453 a B	0,439 a B
DBm	Areão	0,444 b A	0,501 a A	0,476 a A
	Ponte	0,487 b B	0,455 a b B	0,428 a B
Lig	Areão	25,16 a A	24,68 a A	27,07 a A
	Ponte	25,02 a A	26,35 a A	24,68 a B
Cz	Areão	0,44 a A	0,35 b A	0,26 c A
	Ponte	0,32 a b B	0,36 b A	0,30 a A
Pil	Areão	15,62 b A	12,50 a A	12,68 a A
	Ponte	13,87 a B	13,75 a B	14,50 a B

Pil: penetração do pino do *Pilodyn* (mm); DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito (g/cm³); DBm: densidade básica média (g/cm³); Lig: lignina total (%); Cz: teor de cinzas (%). Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo Teste de Tukey, 5% de significância

Para as densidades básicas da madeira, observou-se que os resultados foram bem semelhantes, tendo todos os clones diferido significativamente dentro dos locais de plantio. Os clones I-144 e I-220 apresentarem maiores valores médios de densidade básica na fazenda Areão, enquanto para o clone 3334 o maior valor foi na fazenda Ponte. Segundo Vale, Dias e Santana (2010), em

madeira com alta densidade, tem-se um indicativo de alta densidade do carvão vegetal, sendo esta característica de grande relevância para utilização do carvão nas indústrias siderúrgicas.

O teor de lignina total (Lig) na madeira não apresentou efeito significativo para os clones 3334 e I-220 entre as fazendas analisadas, porém, só o clone I-144 apresentou significância entre as fazendas, apresentando maior valor na fazenda Areão. Analisando-se o efeito de clone dentro do efeito local, observou-se que os clones não apresentaram diferenças estatísticas entre os locais, o que não comprometeria a utilização destes em ambos os locais.

O teor de cinzas (Cz) apresentou diferença significativa entre clones dentro dos locais de cultivo. Os clones I-144 e I-220 não apresentaram diferença entre as fazendas. O clone I-144 foi o que apresentou o menor conteúdo de minerais na madeira, nos dois locais avaliados.

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 Ponte, os clones analisados não diferiram entre si. Resultado diferente foi observado na fazenda Areão, onde a madeira do clone 3334 apresentou o maior valor médio, sendo estatisticamente diferente dos demais clones. O desdobramento e a avaliação do efeito de local dentro de clone mostrou que os clones em estudos apresentaram diferenças entre as fazendas, resultados estes homólogos ao encontrado para a densidade básica, visto que estas duas variáveis apresentam relação inversa.

Na Tabela 25 encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para os teores de extrativos totais, holoceluloses, teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e poder calorífico superior.

Tabela 25 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para as características avaliadas na madeira

Variáveis	Fazenda		Variáveis	Clones		
	Areão	Ponte		3334	I-220	I-144
Ext	3,25 a	3,14 a	Ext	2,62 a	3,34 b	3,62 b
Holo	70,74 a	71,16 a	Holo	71,89 a	70,77 a	70,25 a
C	47,70 a	47,48 a	C	47,61 a	47,91 a	47,26 a
H	6,69 a	6,61 a	H	6,62 a	6,73 a	6,60 a
N	0,21 a	0,20 a	N	0,18 a	0,22 a	0,21 a
S	0,07 a	0,03 b	S	0,02 a	0,08 b	0,05 a b
O	45,30 a	45,66 a	O	45,54 a	45,04 a	45,86 a
PCS	4544 a	4572 a	PCS	4520 a	4588 a	4566 a

Ext: teor de extrativos totais (%); Holo: holocelulose (%); C: carbono (%); H: hidrogênio (%); N: nitrogênio (%); S: enxofre (%); O: oxigênio (%); PCS: poder calorífico superior (kcal/kg). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

Com relação ao efeito de local, somente o teor de enxofre apresentou diferença estatística entre as fazendas, com maior teor na fazenda Ponte. Para as demais variáveis, não foi observada diferença estatística entre as fazendas.

Já com relação aos efeitos de clone, observou-se que somente para os teores de extrativos e enxofre o efeito de clone foi significativo. O clone 3334 foi o que apresentou os menores teores das demais características, sendo diferente dos demais clones.

4.2.1.2 Características avaliadas no carvão vegetal

Na Tabela 26 encontram-se os valores médios referentes à densidade relativa aparente, poder calorífico superior e rendimentos da carbonização dos clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Areão e Ponte.

Tabela 26 Valores médios de densidade relativa aparente, poder calorífico superior e rendimentos avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Fazenda	Clone	DRA	RG	RLP	RGNC	PCS
Areão	I-144	0,363	30,93	47,07	22,00	7558
	I-220	0,435	29,05	46,87	24,07	7582
	3334	0,423	28,02	47,45	24,53	7435
	Média	0,407	29,33	47,13	23,54	7525
	CV (%)	9,54	5,02	0,62	5,72	1,05
Ponte	I-144	0,348	30,54	45,17	24,29	7734
	I-220	0,348	30,21	47,42	22,37	7837
	3334	0,400	29,07	38,90	32,03	7551
	Média	0,370	29,94	43,83	26,23	7707
	CV (%)	8,16	2,57	10,08	19,50	1,88

RG, RLP, RGNC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%), em líquido pirolenhoso (%), em gases não condensáveis (%), respectivamente; PCS: poder calorífico superior (kcal/kg); DRA: densidade relativa aparente (g/cm^3); CV (%): coeficiente de variação amostral entre clones

Avaliando-se a densidade relativa aparente do carvão vegetal, observa-se que, em média, os clones cultivados na fazenda Areão apresentaram maior destaque (407 kg m^{-3}). Porém, na fazenda Ponte, os clones, em média, apresentaram maior poder calorífico. Segundo Brand (2010), consideram-se como diferença significativa no poder calorífico valores superiores a 300 kcal kg^{-1} , tendo sido encontrada no presente trabalho diferença de 182 kcal kg^{-1} , o que não compromete a utilização dos materiais genéticos em ambos os locais em estudo.

Os rendimentos encontrados para os clones de *Eucalyptus* estão próximos da faixa comumente encontrada na literatura (ROSILLO-CALLE; BEZZON, 2005).

Na Tabela 27 encontram-se os valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Areão e Ponte.

Tabela 27 Valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Fazenda	Clone	TMV	TCZ	TCF
Areão	I-144	20,48	0,75	78,84
	I-220	20,29	0,84	78,88
	3334	18,04	1,12	80,92
	Média	19,60	0,90	79,54
	CV (%)	6,92	21,52	1,50
Ponte	I-144	19,92	0,91	79,20
	I-220	22,17	0,82	76,94
	3334	15,88	0,89	83,22
	Média	19,32	0,87	79,79
	CV (%)	16,49	5,51	3,99

TCF, TMV, TCZ: teor de carbono fixo (%), de materiais voláteis (%) e de cinzas (%), respectivamente; CV (%): coeficiente de variação amostral entre clones

Os valores médios encontrados na fazenda Areão e fazenda Ponte, para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, se mostraram próximos, o que não comprometeria a utilização dos materiais genéticos nos locais em estudo.

Segundo Brand (2010) e Nogueira e Lora (2003), para uso na siderurgia, deve-se ter um teor de carbono fixo superior em torno de 75%. No presente trabalho, foram encontrados valores superiores a este.

Quanto ao teor de cinzas, é desejável que o carvão vegetal apresente baixas quantidades, assemelhando-se ao encontrado na literatura (BOTREL et al., 2007; TRUGILHO et al., 2005).

Na Tabela 28 encontram-se os valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio elementares, avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Areão e Ponte.

Tabela 28 Valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Fazenda	Clone	C	H	N	S	O
Areão	I-144	79,03	3,44	0,21	0,36	16,95
	I-220	76,82	3,32	0,22	0,17	19,46
	3334	79,48	3,36	0,24	0,27	16,64
	Média	78,44	3,38	0,22	0,27	17,69
	CV (%)	1,81	1,84	6,84	34,19	8,74
Ponte	I-144	81,11	3,234	0,26	0,145	15,251
	I-220	85,01	3,084	0,21	0,408	11,288
	3334	75,86	3,382	0,22	0,326	20,212
	Média	80,66	3,23	0,23	0,29	15,58
	CV (%)	5,69	4,61	11,50	45,93	28,69

C, H, N, S, O (%): Teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio; CV (%): coeficiente de variação amostral, entre clones

Observa-se que, na Fazenda Ponte, os teores de carbono apresentaram maiores valores médios, comparados aos da fazenda Areão e menores teores médios de oxigênio. Segundo Huang et al. (2009), os resultados encontrados são

favoráveis para bioenergia, visto que estes constituintes apresentam relação positiva com o poder calorífico.

Segundo Kumar et al. (2010), é desejável que os teores de nitrogênio e enxofre se apresentem em baixas quantidades, devido à poluição ambiental quando estes entram em combustão.

4.2.2 Segunda avaliação (68 meses)

4.2.2.1 Características avaliadas na madeira

Na Tabela 29 são apresentados 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 e que os coeficientes de variação experimental foram baixos.

Tabela 29 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 (L)	1	4,708*	0,004*	0,004*	4,558*	4,743 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,004 ^{ns}
Clone (CL)	2	4,750*	0,005*	0,004*	1,275*	0,483 ^{ns}	0,009*	0,818 ^{ns}
L x CL	2	8,016*	0,001*	0,001*	2,906*	10,749*	0,012*	18,269*
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: graus de liberdade; CL: clone; L: local; L x CL: interação local x clone; CVe: coeficiente de variação experimental (%); Pil: penetração do pino do *Pilodyn*; DB_{DAP}: densidade básica do diâmetro à altura do peito; 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

Na Tabela 30 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 as características avaliadas na madeira.

Tabela 30 Valores médios e teste de comparação múltipla realizado para algumas características avaliadas na madeira

Variáveis	Locais	Clones		
		3334	I-220	I-144
Pil	Areão	15,06 b B	12,91 a A	13,25 a A
	Ponte	14,00 a A	13,69 a A	16,88 b B
DB _{DAP}	Areão	0,454 a A	0,504 b B	0,466 a A
	Ponte	0,461 a A	0,473 a A	0,412 b B
DBm	Areão	0,455 a A	0,506 b A	0,476 ab B
	Ponte	0,454 ab A	0,479 b A	0,419 a A
Ext	Areão	1,89 a A	2,87 b A	3,77 c A
	Ponte	4,12 b B	3,31 a A	3,71 ab A
Lig	Areão	29,80 a A	29,50 a A	31,31 a B
	Ponte	29,50 ab B	30,58 b A	27,86 a A
Cz	Areão	0,25 b B	0,18 ab A	0,15 a A
	Ponte	0,15 ab A	0,25 b B	0,15 a A
Holo	Areão	66,21 b A	67,45 ab A	64,77 a A
	Ponte	68,06 a A	65,86 a A	68,28 a B

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 a avaliação do efeito de clone dentro de local mostraram que, na fazenda Areão, os clones I-220 e I-144 apresentaram os

menores valores, enquanto o clone 3334 apresentou o maior valor, sendo estatisticamente diferente dos demais. Resultado diferente foi observado na fazenda Ponte, onde a madeira do clone I-144 apresentou o maior valor médio, sendo estatisticamente diferente dos demais clones. O desdobramento e a avaliação do efeito de local dentro de clone mostraram que somente o clone I-220 não apresentou diferença entre as fazendas Areão e Ponte, para essa característica.

Para a densidade básica da madeira, observa-se que tanto para as densidades básicas média (DBm) como a obtida na altura do DAP (DB_{DAP}), o clone I-220 apresentou o maior valor nos dois locais avaliados. O clone 3334 não apresentou diferença entre locais para a DB_{DAP} e DBm, enquanto o clone I-220 apresentou o mesmo efeito para a DBm. Estes valores se assemelham ao encontrado no trabalho de Vale et al. (1995).

Nesse contexto, o clone I-220, nas 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 I-144, 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 I-220 e I-144 não apresentaram diferença significativa entre os teores de extrativos nos dois locais avaliados. 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 I-220, 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 a análise do teor de lignina são de grande importância, quando se trata da produção de bioenergia, sendo confirmado no trabalho de Demirbas (2001).

Assim, pode-se inferir que o clone I-220, cultivado na fazenda Ponte, e o clone I-144, cultivado na fazenda Areão, apresentaram altos teores de lignina, sendo, portanto, considerados como de maior potencial para a produção de bioenergia entre os clones estudados. Os valores encontrados corroboram os relatados no trabalho de Frederico (2009).

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 à 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 I-144. 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. Na literatura (MORI et al., 2003; PROTÁSIO et al., 2011; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996) são comumente encontrados baixos valores para o teor de cinzas na madeira de eucalipto (0,07% a 1%), corroborando 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 I-220. Estes clones não apresentaram efeito significativo de local. Já para o clone I-144, foi observado efeito significativo de local, indicando elevado teor de holocelulose na Fazenda Ponte.

Na Tabela 31 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.

Tabela 31 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 (L)	1	0,035*	2,041*	0,033*	0,940 ^{ns}	47348*
Clone (CL)	2	0,002*	0,125 ^{ns}	0,006 ^{ns}	0,127 ^{ns}	207 ^{ns}
L x CL	2	0,003*	1,291*	0,001 ^{ns}	1,124*	25230 ^{ns}
Erro	18	0,001	0,263	0,005	0,294	9848
	CVe	9,15	1,10	1,23	1,16	2,17

FV: fator de variação; GL: grau de liberdade; CL: clone; L: local; L x CL: interação local x clone; CVe: coeficiente de variação experimental (%); N: nitrogênio; H: hidrogênio; C: carbono; O: oxigênio; S: enxofre; PCS: poder calorífico superior; *: significativo, a 5%, pelo Teste F; ^{ns}: não significativo, a 5%, pelo Teste F

Na Tabela 32 encontram-se os valores médios dos teores dos componentes elementares (C, H e O), bem como o teste de comparação múltipla realizado.

Tabela 32 Análises dos desdobramentos e testes de comparação múltipla realizados para os teores de nitrogênio, carbono e oxigênio

Variáveis	Locais	Clones		
		3334	I-220	I-144
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

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, tendo o contrário sido encontrado para a Fazenda Areão. Observa-se que os clones 3334 e I-220 procedentes da fazenda Areão apresentaram maior teor de nitrogênio, enquanto para o clone I-144 ocorreu o inverso. Na Fazenda Areão, o clone I-220 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 I-220, 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 I-220, evidenciando maior teor de oxigênio elementar na Fazenda Areão.

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 de cultivados nas fazendas Areão e Ponte, representando uma diferença de 3,38%.

No Gráfico 1 observa-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 teor de hidrogênio e poder calorífico superior.

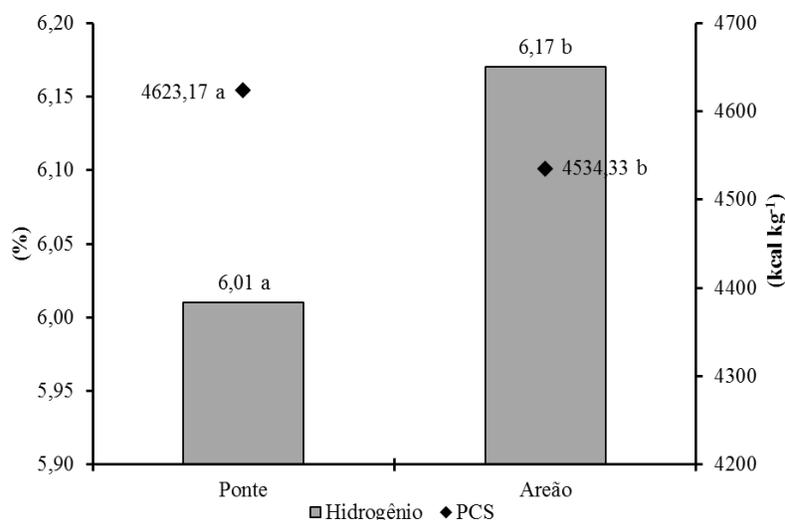


Gráfico 1 Efeito do local no teor de hidrogênio e no poder calorífico superior da madeira dos clones avaliados. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo Teste de Tukey

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. Protásio et al. (2011) encontraram teor de hidrogênio para maravalhas de eucalipto de 6,36%, assemelhando-se ao observado para os clones cultivados na Fazenda Areão.

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 compromete a utilização energética dessa biomassa.

4.2.2.2 Características avaliadas no carvão vegetal

Na Tabela 26 encontram-se os valores médios referentes à densidade relativa aparente, ao poder calorífico superior e aos rendimentos no carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Areão e Ponte.

Tabela 33 Valores médios de densidade relativa aparente, poder calorífico superior e rendimentos avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Fazenda	Clone	DRA	RG	RLP	RGNC	PCS
Areão	I-144	0,348	31,88	44,56	23,55	7626
	I-220	0,374	30,90	32,81	36,29	7649
	3334	0,331	30,54	44,96	24,50	7655
	Média	0,351	31,11	40,78	28,11	7643
	CV (%)	6,17	2,24	16,93	25,24	0,20
Ponte	I-144	0,320	32,47	32,51	35,03	7673
	I-220	0,376	32,11	46,60	21,28	7625
	3334	0,311	31,65	46,00	22,35	7698
	Média	0,335	32,08	41,70	26,22	7665
	CV (%)	10,57	1,28	19,12	29,16	0,48

RG, RLP, RGNC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%), em líquido pirolenhoso (%), em gases não condensáveis (%), respectivamente; PCS: poder calorífico superior (kcal/kg); DRA: densidade relativa aparente (g/cm³); CV (%): coeficiente de variação amostral, entre clones

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.

Avaliando-se a densidade relativa aparente do carvão vegetal, observa-se que, em média, os clones cultivados na Fazenda Areão apresentaram maior destaque ($0,351 \text{ g/cm}^3$). Isso pode ser vantajoso, pois maximiza a densidade energética do carvão.

Botrel et al. (2007) observaram rendimento gravimétrico médio para vários clones de *Eucalyptus* de 35,03%, diferindo em 3,92% e 2,95% do valor encontrado para os clones de *Eucalyptus* nas fazendas Areão e Ponte, respectivamente. Santiago e Andrade (2005), carbonizando o lenho de *Eucalyptus urophylla* até $600 \text{ }^\circ\text{C}$, 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, a composição química da madeira e a temperatura final de carbonização influenciaram esse resultado.

Pode-se constatar que os rendimentos encontrados para os clones de *Eucalyptus* estão próximos da faixa comumente encontrada na literatura (ROSILLO-CALLE; BEZZON, 2005).

Observam-se valores similares para o PCS do carvão vegetal dos diferentes clones nas duas localidades de, em média, 7.643 e $7.665 \text{ kcal kg}^{-1}$, 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 essa característica, evidenciando a potencialidade de produção bioenergética nos locais considerados.

Na Tabela 34 encontram-se os valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Areão e Ponte.

Tabela 34 Valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Fazenda	Clone	TMV	TCZ	TCF
Areão	I-144	19,10	0,73	80,17
	I-220	18,28	0,78	80,95
	3334	19,38	0,88	79,74
	Média	18,92	0,80	80,29
	CV (%)	3,03	9,67	0,76
Ponte	I-144	20,26	0,55	79,19
	I-220	18,00	0,69	81,32
	3334	20,03	0,72	79,26
	Média	19,43	0,65	79,92
	CV (%)	6,40	13,20	1,51

TCF, TMV, TCZ: teor de carbono fixo (%), de materiais voláteis (%) e de cinzas (%), respectivamente; CV (%): coeficiente de variação amostral entre clones

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.

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 (BRAND, 2010). Segundo Botrel et al. (2007), os teores de cinzas encontrados na literatura são baixos, em média, 1%, assemelhando-se ao encontrado no presente trabalho.

Analisando-se o teor de carbono fixo, tanto na Fazenda Areão como na Fazenda Ponte, os valores médios foram próximos, variando menos que 1%, o que pode sugerir a baixa influência do local sobre os materiais genéticos.

Na Tabela 35 encontram-se os valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, nas fazendas Areão e Ponte.

Tabela 35 Valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio avaliados no carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Fazenda	Clone	C	H	N	S	O
Areão	144	76,21	2,978	0,22	0,015	20,577
	220	77,91	2,919	0,19	0,009	18,972
	3334	77,49	2,968	0,19	0,000	19,352
	Média	77,20	2,96	0,20	0,01	19,63
	CV (%)	1,15	1,07	8,66	94,37	4,27
Ponte	144	81,97	2,054	0,15	0,010	15,816
	220	78,84	3,018	0,2	0,000	17,942
	3334	77,01	2,675	0,22	0,000	20,095
	Média	79,27	2,58	0,19	0,003	17,95
	CV (%)	3,16	18,92	18,98	173,21	11,92

C, H, N, S, O (%): Teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio; CV (%): coeficiente de variação amostral, entre clones

Observa-se que, na Fazenda Ponte, os clones apresentaram maiores valores médios nos teores de carbono e menores teores de hidrogênio, quando comparada à Fazenda Areão. Este resultado encontrado na Fazenda Ponte é favorável para a produção de bioenergia (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004). Segundo Oliveira et al. (2010), teores de enxofre abaixo de 0,5% são aceitáveis, tendo sido encontrados no presente trabalho valores inferiores.

4.3 Correlações e modelos ajustados

Na Tabela 36 estão apresentados os coeficientes de correlação linear entre a densidade básica média da madeira e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* para cada fazenda avaliada.

Tabela 36 Coeficientes de correlação linear entre a densidade básica da madeira e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* para cada fazenda avaliada

Fazenda	Graus de liberdade	t calculado	Coeficiente de correlação
Aliança	13	-9,47**	-0,93
Areão	29	-10,43**	-0,89
Brejos	14	-4,87**	-0,79
Ponte	30	-5,14**	-0,68

** : significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste t

Observa-se que todos os coeficientes de correlação linear foram significativos, a 1%, pelo teste t. Esse resultado é um indicativo da possibilidade de ajustes de modelos lineares para a estimativa indireta da densidade básica com base apenas na profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*. Nota-se, ainda, que as variáveis apresentam correlação linear negativa, ou seja, maiores valores de densidade básica estão associados a baixos 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) à encontrada neste trabalho para todas as fazendas avaliadas.

Couto (2010) encontrou baixa correlação negativa de -0,17 para clones de *Eucalyptus grandis* aos 42 meses, porém, aos 54 meses, o valor foi de -0,73, indicando que a idade pode afetar significativamente a relação entre a densidade básica da madeira e a profundidade de penetração do pino do *pilodyn*.

Na Tabela 37 encontra-se o resumo da análise de regressão para o modelo linear simples, considerando-se a densidade básica e a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* como variáveis dependente e independente, respectivamente. Observa-se que todos os modelos ajustados foram significativos, pelo Teste F e apresentaram baixo coeficiente de variação.

Tabela 37 Resumo das análises de regressão para o modelo linear simples

Fazenda	FV	GL	QM	Fc	CV (%)
Aliança	Regressão	1	0,028151	89,70*	3,73
	Resíduo	13	0,000314		
Areão	Regressão	1	0,035821	108,86*	3,94
	Resíduo	29	0,000329		
Brejos	Regressão	1	0,015163	23,77*	5,51
	Resíduo	14	0,000638		
Ponte	Regressão	1	0,012830	26,40*	4,88
	Resíduo	30	0,000486		

FV: fator de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; Fc: F calculado; CV(%): coeficiente de variação; *: significativo, a 1% de probabilidade, pelo Teste F

Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 observa-se a relação funcional observada entre a profundidade de penetração do pino do pilodyn e a densidade básica da madeira, os modelos ajustados e o erro padrão da estimativa para as fazendas Aliança, Areão, Brejos e Ponte, respectivamente. Observa-se que, com exceção da Fazenda Ponte, foi possível obter elevados ajustes para os modelos e baixo erro padrão da estimativa, especialmente nas fazendas Aliança e Areão. Os resultados encontrados demonstram o potencial de utilização do equipamento *Pilodyn* para a estimativa indireta da densidade básica nas fazendas e nos clones avaliados.

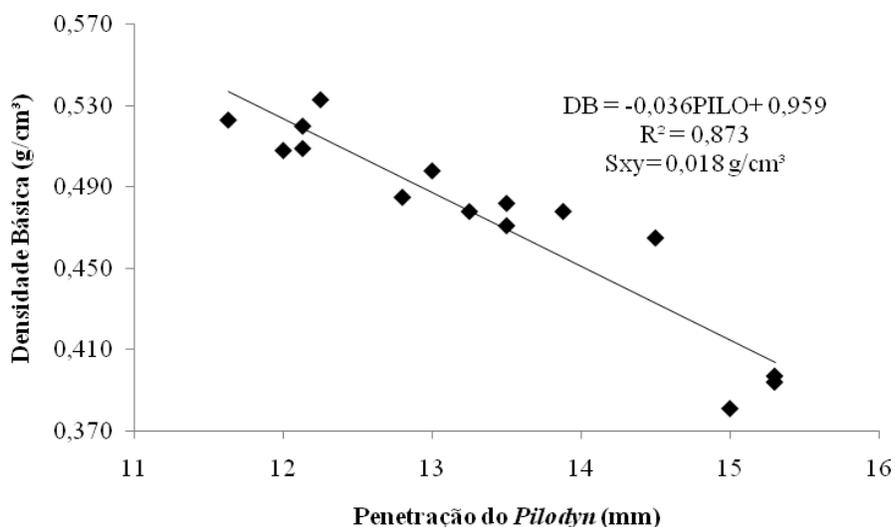


Gráfico 2 Relação funcional entre a profundidade de penetração do pino do pilodyn e a densidade básica da madeira, para a fazenda Aliança

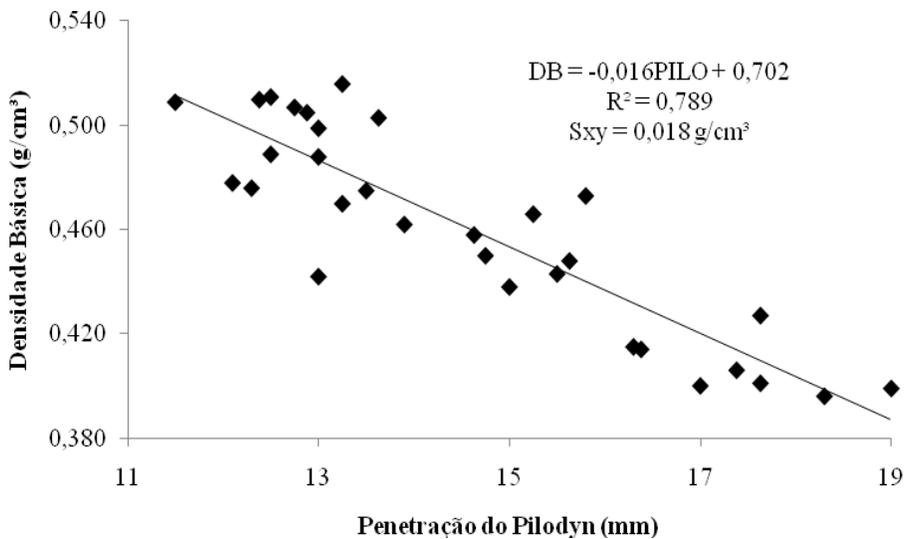


Gráfico 3 Relação funcional entre a profundidade de penetração do pino do pilodyn e a densidade básica da madeira, para a fazenda Areão

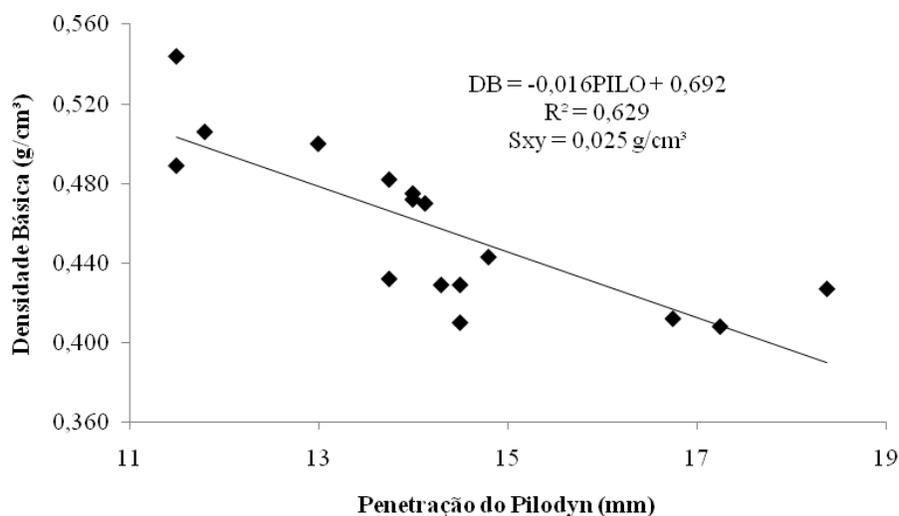


Gráfico 4 Relação funcional entre a profundidade de penetração do pino do pilodyn e a densidade básica da madeira, para a fazenda Brejos

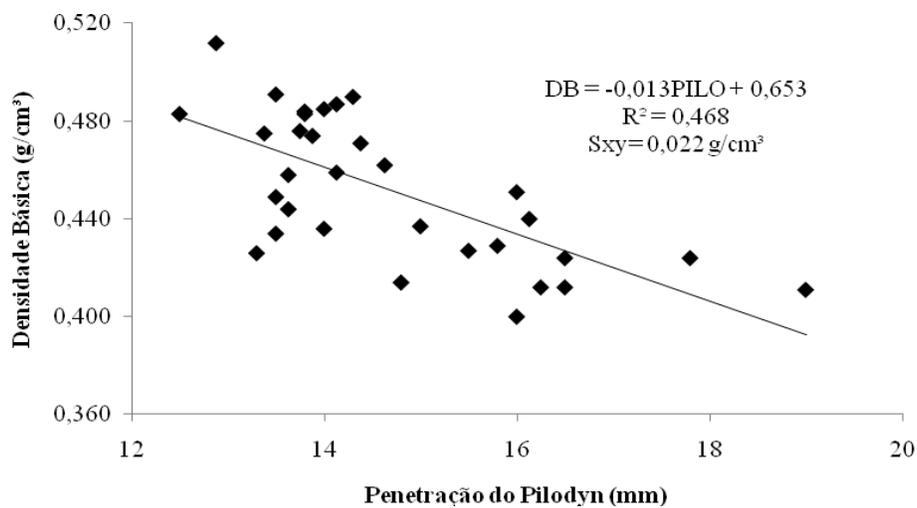


Gráfico 5 Relação funcional entre a profundidade de penetração do pino do pilodyn e a densidade básica da madeira, para a fazenda Ponte

Na Tabela 38 encontram-se os coeficientes de correlação entre o método não destrutivo e a variável densidade relativa aparente e rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Tabela 38 Coeficientes de correlação entre os métodos não destrutivos e a densidade básica e o rendimento em carvão vegetal

Variáveis	Graus de liberdade	t calculado	Coefficiente de correlação
PILO - RGC	22	-0,63 ^{ns}	-0,13
PILO – DRA	22	-1,31 ^{ns}	-0,27

DRL: deformação residual longitudinal; DB: densidade básica; RGC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal; DRA: densidade relativa aparente; PILO: profundidade de penetração do pino do *Pilodyn*; ns: não significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste t

Observa-se que não foi encontrada relação linear significativa entre a profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* e a densidade relativa aparente e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

5 CONCLUSÕES

Observou-se, de maneira geral, efeito da idade na qualidade da madeira.

Na Fazenda Aliança, os clones se mostraram bastantes semelhantes nas características avaliadas tanto na madeira como no carvão vegetal, com destaque para o clone 1277, que apresentou melhor desempenho.

Na Fazenda Areão, destaque para os materiais I-144 e I-220, devido ao alto teor em lignina e densidade básica, além de baixos teores de cinzas encontrados no carvão vegetal.

Na Fazenda Brejos, os clones I-144 e I-220 apresentaram valores médios bem próximos, tanto nas características avaliadas na madeira como no carvão vegetal, o que mostra o grande desempenho destes dois materiais para fins energéticos.

Na Fazenda Ponte, em geral, todos os clones apresentaram grande desempenho para fins energéticos, entretanto, os clones 3334 e 3335 sobressaíram-se em relação aos demais.

O carvão vegetal produzido apresentou potencial para ser utilizado na siderurgia, devido ao elevado teor de carbono fixo, sendo acima de 75%.

A profundidade de penetração do pino do *Pilodyn* mostrou-se satisfatória nos clones avaliados, sendo eficaz para a predição indireta da densidade básica da madeira, em condição de campo.

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.

Verificou-se que, na primeira avaliação, os clones I-220 e 3334 foram destaque nas fazendas Areão e Ponte, respectivamente, por apresentarem maiores valores de densidade básica.

O clone I-144 foi o que apresentou o menor conteúdo de minerais na madeira, nos dois locais avaliados.

Verificou-se, na segunda avaliação, que o clone I-220 apresentou o maior valor de densidade básica, nos dois locais avaliados.

O clone I-144, somente na fazenda Areão, apresentou-se com maiores valores de densidade básica.

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.

Os modelos lineares simples ajustados, com exceção da Fazenda Ponte, permitem estimar de forma indireta a densidade básica da madeira em condição de campo, especialmente nas fazendas Aliança e Areão.

A correlação entre a avaliação não destrutiva com as características do carvão vegetal mostrou-se de baixa magnitude.

REFERÊNCIAS

- ALZATE, S. B.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. de S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 68, p. 87-95, ago. 2005.
- ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.
- ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2011: ano base 2010. Brasília, 2011. 130 p.
- 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 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.
- _____. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- _____. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **M-11/77**: teor de cinzas. São Paulo, 1974. 8 p.
- BALBINOT, R. et al. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do Estado do Paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, abr./jun. 2008.
- BARRICHELO, L. E. G. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1992, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 1992. p. 726-731.

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

BOTREL, M. C. G. et al. Melhoria genética das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, maio/jun. 2007.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRASIL, M. A. A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. Saligna* Smith e *E. Grandis*, Hill ex-Maiden aos cinco anos de idade, função do local e do espaçamento. **Boletim do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 2/3, p. 129-149, 1971.

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, n. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J. O. et al. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **Boletim do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, abr. 1983.

COUTO, A. M. **Modelagem da densidade básica e caracterização química em clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis***. 2010. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

CRUZ, C. R. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus* para utilização na indústria madeireira**. 2000. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1989. v. 2, p. 93-121.

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

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. **Energy, Exploration & Exploitation**, Hebei, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2004.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Paris, v. 172, p. 33-48, 1977.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation *Eucalypts* for wood and fibre properties**. Chicago: CSIRO, 1977. 126 p.

FOELKEL, C. E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: SBF, 1990. p. 719-720.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

FRIEDL, A. et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 544, n. 1/2, p. 191-198, Feb. 2005.

GARCIA, C. B. **Anatomia e propriedade de cinco madeiras paraguaias**. 1995. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reations**. New York: J. Wiley, 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.

GOUVÊA, A. de F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 349-358, mar./abr. 2011.

GUTIÉRREZ, A.; RODRIGUEZ, I. M.; RIO, J. C. del. Chemical y characterization of lignina fractions in industrial hemp bast fibers used for manufacturing high-quality paper pulps. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 12, p. 2138-2142, Mar. 2006.

HANSEN, C. P. **Application of the *Pilodyn* in forest tree improvement**. Denmark: Danida Forest Seed Centre, 2000. 11 p. (Series of Technical Notes, 55).

HUANG, C. et al. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793-1797, June 2009.

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.

KUMAR, R. et al. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Brazilian Journal of Forestry Research**, Colombo, v. 21, n. 4, p. 514-516, Dec. 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. 9-17, 2011.

MAJUMDER, A. K. et al. Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal. **Fuel**, London, v. 87, n. 13/14, p. 3077-3081, 2008.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 76-89.

MORI, F. A. et al. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 396-400, 2003.

MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Estudos de variabilidade numa árvore de *Eucalyptus globulus*. **O Papel**, São Paulo, v. 63, n. 6, p. 71-79, 2002.

MOURA, V. P. G.; BARNES, R. D.; BIRKS, J. S. A comparison of three methods of assessing wood density in provenances of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. and other *Eucalyptus* species in Brazil. **Australian Forest Research**, Melbourne, v. 17, n. 1, p. 83-90, Feb. 1987.

MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 415-420, Mar. 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 199 p.

NORDIN, A. Chemical and elemental characteristics of biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 6, n. 5, p. 339-347, May 1994.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 30, n. 11, p. 973-982, Nov. 2006.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, A. D.; LIMA, J. T.; ROSADO, S. C. S. Estimativa de massa lenhosa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 345-348, 1991.

OLIVEIRA, J. B. de et al. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 59-73.

OUZIA, A. et al. Pyrolysis-GC/MS and TG/MS study of mediated laccase biodelignification of *Eucalyptus globulus* kraft pulp. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 78, n. 2, p. 233-242, Mar. 2007.

PÁDUA, F. A. de. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeirade um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, London, v. 84, n. 5, p. 487-494, May 2005.

PENEDO, W. R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 49 p.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113 p. (EMBRAPA Florestas. Documentos, 38).

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 76 p.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. 451 p.

PINHEIRO, P. C. da C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, Botucatu, v. 2, n. 2, p. 159-168, jul./dez. 2005.

PROTÁSIO, T. P. et al. 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.

QUEIROZ, S. C. S. et al. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Vicosa, MG, v. 28, n. 6, p. 901-909, nov./dez. 2004.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 jun. 2011.

RAYMOND, C. A. Tree breeding issues for solid wood products. In: _____. **The future of Eucalypts for wood products**. Launceston: IUFRO, 2000. p. 265-270.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. Where to shoot your *Pilodyn*: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Tasmânia. **New Forests**, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221, May 1998.

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. (Ed.). **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: UNICAMP, 2005. p. 16-25.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 2009. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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

SANTOS, R. C. dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal declones de eucalipto**. Lavras: UFLA, 2010. 159 p.

SENELWA, K.; SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 17, n. 2, p. 127-140, Aug. 1999.

SILVA, J. de C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Vicosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, maio/jun. 2005.

_____. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

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. et al. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, nov./dez. 2006.

SHIMOYAMA, V. R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** 1990. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1990.

THIERSC, C. R. et al. 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, jul./set. 2006.

THIPKHUNTHOD, P. et al. Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, London, v. 84, n. 7/8, p. 849-857, Aug. 2005.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus***. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

TRUGILHO, P. F. et al. 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, mar./abr. 1997.

_____. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, jul./dez. 2001.

_____. 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, abr./jun. 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, v. 2, n. 1, p. 94-111, jan./jun. 1996.

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, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. **Caracterização da madeira e da casca de *Sclerolobium paniculata*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético**. Botucatu: UNESP, 2000. 26 p.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, jan./mar. 2010.

VALE, A. T. et al. Densidade básica média, em função da profundidade de penetração do pino do “*Pilodyn*” e da classe diamétrica, e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 19, n. 1, p. 80-91, jan./fev. 1995.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (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 “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1991.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control**. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 363 p.