



LUIZ MENDES TAKARADA

**EFEITO DA MORFOLOGIA DAS FIBRAS DAS
MADEIRAS DE *Eucalyptus* e *Corymbia* NA
PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO
VEGETAL**

LAVRAS – MG

2015

LUIZ MENDES TAKARADA

**EFEITO DA MORFOLOGIA DAS FIBRAS DAS MADEIRAS DE
Eucalyptus e *Corymbia* NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO
VEGETAL**

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 A Madeira como Matéria-Prima, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientadores

Dr. Alfredo Napoli

Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado

LAVRAS – MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Takarada, Luiz Mendes.

Efeito da morfologia das fibras das madeiras de *Eucalyptus* e
Corymbia na produção e qualidade do carvão vegetal / Luiz
Mendes Takarada. – Lavras : UFLA, 2015.
74 p. : il.

Dissertação(mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Carvão vegetal. 2. Posição radial. 3. Posição longitudinal. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

LUIZ MENDES TAKARADA

**EFEITO DA MORFOLOGIA DAS FIBRAS DAS MADEIRAS DE
eucalyptus e *corymbia* NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO
VEGETAL**

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 A Madeira como Matéria-Prima, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de agosto de 2015.

Dr. José Tarcisio Lima

UFLA

Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato

EPAMIG

Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador:

LAVRAS – MG

2015

À minha família e amigos, a base de tudo...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças sempre para poder continuar na minha jornada.

À minha mãe e irmãs por todo amor e carinho incondicional. Aos meus sobrinhos, cunhado e padrasto, pelo amor e companheirismo.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade concedida.

Ao professor Paulo Trugilho, pela confiança e pelas horas de orientação que fizeram com que eu pudesse chegar até aqui.

Aos professores Alfredo, Rosado, Tarcísio e Margarete, pela confiança e ajuda proporcionada neste trabalho.

À Vallourec, pela concessão da bolsa de estudo. Em especial, um grande obrigado para o Hélder e a Ana Paula.

Aos grandes irmãos da República Araguaia, pela ajuda que sempre pude contar dentro de casa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pelo conhecimento e apoio.

Aos amigos do departamento de Ciência & Tecnologia da madeira (Tati, Monica, Raul, Yllian e Breno).

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Conduziu-se, este estudo, com o objetivo de avaliar a influência da morfologia das fibras da madeira sobre a produção e qualidade do carvão vegetal. Foram utilizadas madeiras oriundas de três materiais genéticos, o *C. citriodora* e dois clones de híbridos naturais de *E. urophylla* (VM04 e MN463). Cada material genético foi representado por cinco árvores com diâmetro médio da população. A amostragem no fuste considerou tanto a variação radial (cerne e albarno) como a longitudinal. Os materiais foram caracterizados anatomicamente e, posteriormente, carbonizados a uma taxa de aquecimento de 60 °C hora⁻¹ até a temperatura de 400°C permanecendo por 30 minutos. O carvão vegetal produzido foi caracterizado física e quimicamente, além disso, foi obtido o rendimento gravimétrico de carbonização. Pelos resultados obtidos, concluiu-se que o clone MN 463 apresentou o menor poder calorífico superior, diferindo estatisticamente dos demais materiais genéticos. O clone VM 04 obteve o pior no rendimento gravimétrico em carvão. O *C. citriodora* obteve os maiores valores de densidade relativa aparente (DRA) e densidade de energia (DE). O albarno apresentou poder calorífico superior (PCS) e DRA maior que o cerne, porém o rendimento gravimétrico em carvão (RGC) foi maior no cerne. A composição química imediata do carvão não foi influenciada por nenhum dos fatores avaliados. O RGC, DRA, comprimento, largura e espessura da parede da fibra, índice de esbelteza, fração parede e índice de Runkel apresentaram tendência linear de decréscimo no sentido base-topo. A DRA apresentou correlação negativa e significativa com a largura, diâmetro do lume da fibra e coeficiente de flexibilidade e correlação positiva e significativa com o índice de esbelteza e fração parede da fibra. ADE apresentou correlação positiva e significativa com a largura, diâmetro do lume da fibra e coeficiente de flexibilidade, tendo, somente, uma relação negativa com a fração parede.

Palavras-chave: Variação radial. Posição longitudinal. Carvão vegetal. Qualidade do carvão.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the influence of the wood fiber morphology on the yield and charcoal quality. Woods from three genetic materials were used, the *C. citriodora* and two clones of natural hybrids of *E. urophylla* (VM04 and MN463). Each genetic material is represented by five trees with a mean diameter of the population. Sampling the stem considered both the radial (heartwood and sapwood) as the longitudinal variation. The materials were characterized anatomically and subsequently carbonized at a heating rate of 60°C hour⁻¹ until the temperature of 400°C during 30 minutes. The charcoal produced was physically and chemically characterized, moreover was obtained gravimetric yield of carbonization. The results obtained, it was concluded that the MN 463 clone had the lowest gross calorific value, differing from the other genetic materials. The VM 04 clone got worse in the gravimetric charcoal yield. The *C. citriodora* obtained the highest values of apparent relative density (ARD) and energy density (ED). The sapwood presented gross calorific value (GCV) and ARD greater than the heartwood, but gravimetric charcoal yield (GCY) was higher in the heartwood. The immediate chemical composition of charcoal was not influenced by any of the factors evaluated. The GCY, ARD, length, width and thickness of the fiber wall, slenderness ratio, fraction wall and Runkel index showed a linear trend of decrease in longitudinal direction. The ARD showed a negative and significant correlation with the width, lumen diameter of the fiber and coefficient of flexibility and positive and significant correlation with slenderness ratio and wall fraction of the fiber. The ED was positively and significantly correlated with the width, lumen diameter of the fiber and coefficient of flexibility, having only a negative relationship with the wall fraction.

Key-words: Radial variations. Longitudinal position. Charcoal. Charcoal quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema ilustrativo da amostragem realizada.....	31
Figura 2	Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem para o <i>C. citriodora</i>	37
Figura 3	Distribuição residual do modelo ajustado para o <i>C. citriodora</i>	37
Figura 4	Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem para o MN 463	38
Figura 5	Distribuição residual do modelo ajustado para o MN 463	38
Figura 6	Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem para o VM 04	39
Figura 7	Distribuição residual do modelo ajustado para o VM 04	39
Figura 8	Relação funcional entre a posição longitudinal de amostragem e a densidade relativa aparente do carvão	44
Figura 9	Relação funcional entre a densidade de energia e a posição longitudinal de amostragem na árvore	45
Figura 10	Relação funcional entre o comprimento das fibras e a posição longitudinal de amostragem	47
Figura 11	Relação funcional entre a largura da fibra e a posição longitudinal de amostragem na árvore	47
Figura 12	Relação funcional entre o diâmetro do lume e a posição longitudinal de amostragem na árvore	48
Figura 13	Relação funcional entre a espessura da parede da fibra e a posição longitudinal de amostragem na árvore.....	48
Figura 14	Relação funcional entre a fração parede da fibra e a posição longitudinal de amostragem	51
Figura 15	Relação funcional entre o índice de esbelteza e a posição longitudinal de amostragem	52

Figura 16	Relação funcional entre o coeficiente de flexibilidade e a posição longitudinal de amostragem.....	52
Figura 17	Relação funcional entre o índice de Runkel e a posição longitudinal de amostragem	53
Figura 18	Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem.....	55
Figura 19	Relação funcional entre a densidade relativa aparente e a posição longitudinal de amostragem.....	58
Figura 20	Relação funcional entre a densidade de energia e a posição longitudinal de amostragem	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo da análise de variância para rendimento em carvão e análise química imediata	36
Tabela 2	Desdobramento da interação entre material genético dentro de posição longitudinal	36
Tabela 3	Valores médios de rendimento gravimétrico em carvão dos materiais genéticos em cada posição radial	40
Tabela 4	Resumo da análise de variância para densidade relativa aparente, poder calorífico superior e densidade de energia	41
Tabela 5	Valores médios do poder calorífico superior (PCS) dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	42
Tabela 6	Valores médios de poder calorífico superior (PCS) dos materiais genéticos nas posições radiais de amostragem	42
Tabela 7	Valores médios de densidade relativa aparente (DRA) dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	42
Tabela 8	Valores médios de densidade relativa aparente (DRA) dos materiais genéticos em cada posição radial	43
Tabela 9	Valores médios de densidade de energia dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	44
Tabela 10	Resumo da análise de variância para as características dimensionais das fibras	46
Tabela 11	Valores médios para as características dimensionais das fibras e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	46

Tabela 12	Resumo da análise de variância para índices os de qualidade das fibras da madeira.....	50
Tabela 13	Valores médios para os índices de qualidade da fibra dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	50
Tabela 14	Resumo da análise de variância para rendimento gravimétrico em carvão e análise química imediata.....	54
Tabela 15	Valores médios de rendimento em carvão dos materiais genéticoe classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	55
Tabela 16	Resumo da análise de variância para poder calorífico superior densidade relativa aparente e densidade de energia	56
Tabela 17	Valores médios de poder calorífico superior dos materiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	56
Tabela 18	Valores médios de densidade relativa aparente e densidade de energia dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).....	57
Tabela 19	Correlação significativa entre as características anatômicas com as densidades aparente e energética do carvão.....	60
Tabela 20	Correlação entre as características anatômicas com as densidades relativa aparente e energética do carvão do material cerne.....	61
Tabela 21	Correlação entre as características anatômicas com as densidades relativa aparente e energética do carvão do material alburno	62
Tabela 22	Correlação entre as características do carvão vegetal de cerne e alburno	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	A madeira como matéria - prima para o carvão vegetal	17
3.2	Propriedades da madeira que afetam a produção do carvão vegetal	18
3.2.1	Umidade da madeira	19
3.2.2	Componentes químicos da madeira	20
3.2.3	Densidade básica e anatomia da madeira	21
3.3	Carvão vegetal	25
3.4	Importância do carvão vegetal para Minas Gerais	27
3.5	Parâmetros no processo de carbonização	28
4	MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1	Material biológico	30
4.2	Amostragem e preparo do material	30
4.3	Rendimento gravimétrico	32
4.4	Análise química imediata	32
4.5	Poder calorífico superior	32
4.6	Densidade relativa aparente	32
4.7	Densidade de energia	33
4.8	Caracterização anatômica da madeira	33
4.9	Análise estatística dos dados	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Caracterização do carvão vegetal produzido de cerne, alburno e posição longitudinal de amostragem	35
5.2	Caracterização das fibras e do carvão vegetal nas diferentes posições longitudinais de amostragem	45
5.3	Correlação entre as características morfológicas das fibras e as do carvão vegetal	60
6	CONCLUSÃO	64
6.1	Caracterização do carvão vegetal produzido de cerne, alburno e posição longitudinal de amostragem	64
6.2	Caracterização das fibras e do carvão vegetal nas diferentes posições longitudinais de amostragem	65
6.3	Correlação entre as características anatômicas e as do carvão vegetal	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O crescente consumo energético culminou em uma população excessivamente poluidora, utilizando basicamente combustíveis não-renováveis para suprir suas demandas de energia. Atualmente, a preocupação dos países é em relação ao uso excessivo e a dependência dos combustíveis fósseis, aos danos das emissões de poluentes, concentração de CO₂ na atmosfera e ao aquecimento global.

No Brasil, existe enorme potencial para a utilização de fontes renováveis de energia, dentre elas, a energia solar, eólica, hidrelétrica e a energia proveniente da biomassa (SOUZA, 2002).

As perspectivas de diminuição de oferta de combustíveis fósseis, as restrições ecológicas e o consumo crescente de energia têm propiciado a retomada de interesse do uso da biomassa para a produção de energia. Isso é compreensível, visto que a biomassa é uma matéria-prima energética importante, renovável e, em geral, pouco poluente quando comparada aos outros tipos de combustíveis (SEYE; PINHEIRO, 2001). Dentro desse contexto, o carvão vegetal advindo das florestas plantadas e manejadas tem sido importante difusor dessa fonte de energia.

Em razão dos benefícios diretos e indiretos, faz-se necessário que os governos e a sociedade aumentem o empenho para incentivar e utilizar mais as fontes renováveis de energia. Sendo assim, o uso de produtos florestais e da agroindústria para a geração de energia, principalmente no Brasil, onde a madeira já é amplamente usada para essa finalidade, deverá ser incrementada.

O Brasil hoje conta com uma área plantada com o gênero *Eucalyptus* e *Corymbia* de, aproximadamente, 5,5 milhões de hectares, aumento de 3,2% em relação ao ano base anterior. Minas Gerais se destaca como estado com maior participação de área plantada, representando 1,4 milhões de hectares,

aproximadamente 25,6% do total plantado (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014). Além disso, é o Estado de maior produção e consumo de carvão vegetal, possuindo também em seu território a maior exploração de minério de ferro do Brasil. Essas atividades combinadas fazem de Minas Gerais o maior parque siderúrgico nacional a carvão vegetal e o maior produtor de aço, ferro-gusa e ferros-liga.

As funções do carvão no processo de termorredução do minério de ferro são, basicamente, fornecer energia na forma de calor, recompor o poder redutor do dióxido de carbono, sustentação da carga de minério de ferro e permitir a percolação gasosa pelo leito (COUTO, 2014).

O carvão advindo de florestas plantadas apresenta balanço equilibrado em relação às emissões de gases na atmosfera, pois as florestas em crescimento possuem papel ecológico no consumo de dióxido de carbono (CO_2) e liberação de oxigênio (O_2), fazendo com que o processo siderúrgico apresente produção ecologicamente mais correta em comparação ao uso do coque mineral para suprir as demandas da siderurgia.

É desejável sempre obter o maior rendimento possível na carbonização, tendo em vista que isso representará redução das emissões de poluentes no processo produtivo convencional, ou seja, dos fornos de carbonização.

Para se obter rendimento satisfatório da carbonização, faz-se necessário o estudo da qualidade da matéria-prima utilizada e do sistema de carbonização a ser adotado. Segundo Trugilho et al. (1997) a composição química, principalmente o alto teor de lignina, aliada à alta densidade básica da madeira, contribuem de forma positiva para o rendimento em carvão vegetal. Além disso, a anatomia da madeira é um ponto importante na produção de carvão vegetal. As características anatômicas típicas de uma espécie/clone influenciam diretamente a produção do carvão vegetal, culminando, dependendo da proporção dos componentes anatômicos, em uma densidade básica mais alta ou baixa,

influenciando também as características físicas e mecânicas do carvão, tais como resistência, densidade e porosidade.

Couto (2014) observou que as variáveis anatômicas de largura de fibra, frequência e diâmetro de vaso não apresentaram grande influência sobre as propriedades do carvão vegetal. Entretanto, a densidade básica, espessura de parede, diâmetro de lume e fração parede da fibra apresentaram maior influência sobre a densidade relativa aparente e densidade energética do carvão vegetal.

É de grande importância entender melhor os efeitos das posições radiais e longitudinais na produção e qualidade do carvão vegetal, pois essas variações na madeira são, em grande parte, responsáveis pela grande variação no padrão do carvão vegetal produzido. Entender como é o comportamento, por exemplo, da madeira do cerne e alburno frente ao processo de carbonização é importante e auxiliará na escolha de materiais genéticos mais adequados a essa finalidade. Segundo Couto (2014), o rendimento gravimétrico, poder calorífico superior, densidade relativa aparente e densidade de energia foram afetados, diretamente, pela posição radial de amostragem na madeira que originou o carvão vegetal. Segundo Oliveira et al. (1982), considera-se como carvão vegetal todo material de origem biológica que foi submetido a temperaturas superiores a 300°C, por um dado período de tempo. Nessas condições, os componentes químicos que compõem esses materiais sofrem degradação térmica e se transformam em carvão e gases.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral, neste estudo, foi verificar o efeito de algumas características anatômicas da madeira na produção e qualidade do carvão vegetal em diferentes materiais genéticos.

Como objetivos específicos citam-se:

- a) comparar o desempenho dos materiais genéticos em relação à produção e qualidade do carvão vegetal;
- b) verificar a interferência da posição radial (cerne e alborno) e longitudinal de amostragem (base-topo) na carbonização da madeira;
- c) verificar a associação entre as características anatômicas e índices de qualidade das fibras na produção e qualidade do carvão vegetal.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A madeira como matéria - prima para o carvão vegetal

A madeira utilizada na produção do carvão advém de duas fontes: florestas nativas, em que há o aproveitamento das árvores presentes na área, em muitos casos como aproveitamento da biomassa, e nas florestas plantadas, em que por sua maioria são do gênero *Eucalyptus* (BRITO; BARRICHELO, 2006).

O gênero *Eucalyptus* se apresenta como um dos mais importantes para a produção de madeira em árvores de rápido crescimento, não só pela capacidade produtiva e adaptabilidade a diversos ambientes de clima e solo, mas também pela grande diversidade de espécies, tornando possível atender aos requisitos tecnológicos dos mais diferentes segmentos de produção industrial. Nenhum outro gênero florestal conseguiu reunir tantas vantagens e, por isso, é um dos mais plantados do mundo, fazendo parte da economia de mais de muitos países (OLIVEIRA; FIEDLER; NOGUEIRA, 2008).

As florestas plantadas possuem um papel fundamental na área de produção. Hoje, o Brasil e, principalmente, Minas Gerais possuem tecnologias avançadas na atividade. O eucalipto possuindo rápido crescimento e densidade considerável garante um carvão de boa qualidade e é uma matéria- prima renovável (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS, 1980).

No ano de 2013, foram consumidos aproximadamente 24 milhões de m³ de madeira somente para o setor de carvão vegetal, contando com 76% de participação desse valor, somente oriundo de florestas plantadas (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014).

Dentre as formas de energia, nas quais a madeira se faz presente, o carvão vegetal se destaca como um produto de alta relevância. Essa importância

é acentuada, em decorrência da sua utilização, quase que por completo no Brasil, como termorreduzidor do minério de ferro. O Brasil se destaca ainda mais, por ser o maior produtor e consumidor desse produto representando 14% da produção mundial, visto que nos outros países a grande utilização é do carvão mineral (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014).

Segundo Pimenta, Barcellos e Oliveira (2008), como a madeira é a matéria-prima para a produção de carvão, deve-se conhecê-la em detalhes, pois suas características variam entre espécies, entre indivíduos da mesma espécie, dentro da árvore e conforme a idade da árvore. Assim, o carvão produzido terá variação de acordo com a qualidade da matéria-prima utilizada.

Alguns autores também destacam que a qualidade bem como o rendimento do carvão produzido, está diretamente ligada, pelo menos em parte, a qualidade da madeira utilizada (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982; WENZL, 1970).

A madeira pode ser utilizada ainda como fonte de energia. A forma mais simples de se utilizar a madeira como fonte energética é sua queima direta. A decomposição dos elementos químicos orgânicos que constituem a madeira libera quantidades consideráveis de energia quando em combustão. Atualmente, existem distintas formas de combustíveis produzidos a partir da madeira, a exemplo citam-se os gases energéticos produzidos por processos de gaseificação (ARANTES et al., 2008), alcatrão e carvão vegetal pelo processo de carbonização (OLIVEIRA et al., 2013). Logo, a madeira pode ser considerada como um importante e diversificado recurso energético.

3.2 Propriedades da madeira que afetam a produção do carvão vegetal

Vários autores destacam a importância de alguns parâmetros da madeira que devem ser levados em consideração quando seu uso for destinado à

produção de carvão vegetal e bioenergia. Dentre eles estão relacionados os valores de densidade básica e poder calorífico, baixo teor de minerais e altos teores de lignina, tais características acarretam em alto rendimento, baixo custo e elevada qualidade e produção do carvão vegetal (TRUGILHO et al., 1997; TRUGILHO; SILVA, 2001), além disso, o teor de água presente na madeira também irá afetar de forma significativa a qualidade do carvão vegetal produzido.

3.2.1 Umidade da madeira

A umidade presente na madeira é uma propriedade física muito importante quando o uso da madeira é destinado à geração de energia, pois uma considerável quantidade de calor é despendida na forma de vapor de água. Por esse motivo, teores de umidade acima do limite exigem energia externa para secar e, posteriormente, entrar em combustão, sendo, portanto, um parâmetro considerado indesejado em qualquer tipo de processo energético. Quando a madeira possui uma maior porcentagem de umidade, menor a sua combustão, pois o processo de evaporação absorve energia na queima (JARA, 1989).

Segundo Valente e Lelles (1986), a fabricação de carvão com madeira úmida, origina um carvão friável e quebradiço, elevando o teor de finos durante o manuseio e transporte. O autor sugere carbonizar a madeira com umidade, base seca, entre 20 e 30%.

Klitzke (1998), avaliando a influência do teor de umidade e da idade no rendimento do carvão de bracinga, em diferentes temperaturas de carbonização, concluiu, com relação à influência da umidade, que o aumento desta ocasiona uma redução significativa do rendimento do carvão, onde o valor médio mais elevado do rendimento foi obtido na temperatura de 450°C a 0% de umidade. O menor valor para o rendimento foi observado na temperatura final

de 550°C a 30%. Pode-se observar que há uma tendência do rendimento em carvão diminuir com o aumento do teor de umidade da madeira.

Teores de umidade elevados, principalmente na região central da madeira (cerne) deverá provocar fendilhamento no carvão vegetal, predispondo em maior geração de finos, fato ocasionado pelo aumento da pressão de vapor por ocasião da transformação da madeira em carvão vegetal (COTTA, 1996).

A madeira recém-abatida apresenta grandes quantidades de água, que reduzem o poder calorífico e inviabilizam seu uso para energia (BRAND; MUÑIZ, 2010). A estocagem ao ar livre é o método mais difundido de secagem da madeira para fins energéticos com baixo custo, mas o tempo de secagem é maior. A perda de água por esse método é maior nas primeiras semanas (REZENDE et al., 2010). A umidade diminui o rendimento gravimétrico, pois parte do material lenhoso é queimado para retirada da água na forma de vapor (ROUSSET et al., 2011), o que diminui o poder calorífico do material lenhoso (BRAND et al., 2011) e aumenta a friabilidade do carvão.

3.2.2 Componentes químicos da madeira

De acordo com Lewin e Goldstein (1991), em termos médios, as madeiras são constituídas basicamente por: 40-45% de celulose; 13-35% (folhosas) e 25-35% (coníferas) de hemiceluloses; 18-25% (folhosas) e 25-35% (coníferas) de lignina; 3-8% de extrativos; e 0,4% de cinzas.

Os mecanismos de decomposição da lignina não estão bem definidos, em razão da sua estrutura relativamente complexa, ocasionando rupturas e formação de inúmeros compostos. O comportamento da lignina frente ao processo de carbonização é o principal responsável pela formação do carvão. O produto mais importante da decomposição térmica da lignina é o carvão,

demonstrando a sua relação com o rendimento em carvão (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982; SARKANEN; LUDWIG, 1971).

A celulose é o componente da madeira mais fácil de ser isolado sendo, portanto, o componente mais estudado. Na faixa dos 600 °C a degradação da celulose é quase completa. Como o processo de carbonização ocorre a temperaturas superiores de 300 °C, pode-se concluir que a celulose contribui pouco para o rendimento gravimétrico do carvão (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

As hemiceluloses, por sua vez, são materiais instáveis, em razão da sua natureza amorfa (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982). Elas se degradam em duas fases: a primeira se desfazendo em partículas menores, e a segunda a despolimerização das cadeias pequenas, formando unidades de monômeros, formando, assim, juntamente com os demais polímeros, grande quantidade de materiais voláteis.

3.2.3 Densidade básica e anatomia da madeira

A densidade básica é reconhecida como um dos mais importantes parâmetros para avaliação de qualidade da madeira. Duas condições fazem dela um importante recurso na obtenção de um padrão de qualidade: primeiro por ser de fácil determinação e, segundo, por estar relacionada às demais características provenientes dela (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991).

A densidade da madeira, bem como as demais propriedades, varia de uma espécie para outra. As variações da densidade são resultantes das diferentes espessuras da parede celular, das dimensões das células, das inter-relações entre esses dois fatores e da quantidade de componentes presentes por unidade de volume (PANSIN; ZEEUW, 1980).

A densidade da madeira tem uma relação direta com o rendimento do carvão quando expresso em volume, pois quanto maior a densidade maior a quantidade de matéria seca por unidade de volume (BRITO; BARRICHELLO, 1977).

Segundo Trugilhoe Silva (2001), a densidade básica, dentre as características físicas da madeira, apresenta a maior influência sobre a qualidade do carvão vegetal.

Oliveira et al. (1989), encontraram a existência e uma forte correlação positiva quando analisaram a densidade básica da madeira em relação à densidade aparente do carvão. Essa correlação é destacada por outros autores avaliando outras espécies (VALENTE, 1985; VALE et al., 2001), mostrando, assim, que a densidade básica da madeira é um fator importante na escolha das espécies e com grande parcela de responsabilidade na produção do carvão vegetal.

Em relação aos estudos da madeira que buscam uma melhoria no processo produtivo, as características físicas, químicas e anatômicas da madeira estão relacionadas diretamente às propriedades do carvão vegetal produzido (TRUGILHO; SILVA, 2004).

Segundo Silva (2001), além da identificação das espécies, os estudos anatômicos possibilitam informações sobre a estrutura do lenho, permitindo identificação das relações entre o lenho e as características gerais da madeira, inclusive seu potencial para a geração de energia. Pádua (2009) afirma que o estudo dos parâmetros referentes à qualidade das fibras fornece informações para auxiliar na indicação de espécies potenciais para a geração de energia e a produção de carvão vegetal. O autor recomenda madeiras para a geração de energia que apresentem composição anatômica caracterizada pela presença de fibras com fração parede alta e ressalta que essa característica está aliada à ocorrência de alta densidade básica.

Oliveira et al. (2006), em estudo cujo objetivo foi caracterizar anatomicamente a madeira de *Mimosa tenuiflora*, assim como as propriedades do carvão produzido com a mesma espécie, sugere que para a produção de carvão vegetal, é importante buscar madeiras que apresentem uma elevada densidade e fibras com maior fração parede. Em contrapartida, é desejável encontrar baixas proporções de vasos e tecidos parenquimáticos.

Couto (2014) observou que a densidade relativa aparente do carvão é diretamente proporcional à espessura de parede da fibra, fração parede da fibra e densidade básica da madeira e que madeiras com menor proporção de espaços vazios tendem a dar origem a um carvão com a mesma característica quando carbonizada. Concluiu-se, então, que madeiras mais densas, com maior espessura de parede e fração parede tendem a produzir carvão com maior massa por unidade de volume.

A densidade energética do carvão é o resultado do produto entre a densidade relativa aparente e o poder calorífico superior do carvão vegetal. O poder calorífico superior é função da composição elementar do material. Logo, se os parâmetros de carbonização forem constantes, a composição elementar tende a apresentar pouca ou nenhuma variação. A densidade relativa aparente, por sua vez, é altamente influenciada pelas variáveis anatômicas e, conseqüentemente, densidade básica da madeira, apresentando, portanto, uma maior magnitude de variação. Pelo exposto, a densidade energética deve sofrer maior influência da densidade do carvão vegetal, que, por sua vez, é altamente influenciada pelos parâmetros anatômicos e físicos da madeira (COUTO, 2014).

O material madeira é basicamente apresentado como um material higroscópico, em razão da grande afinidade da água com os grupos OH presentes na mesma; heterogêneo, por possuir em sua constituição holocelulose, lignina, extrativos e cinzas; e também anisotrópico, onde, de acordo com a

posição do corte na madeira, observam-se os diferentes constituintes em formas e tamanhos diferenciados.

É sabida a grande variação dos elementos presentes na madeira no sentido base-topo e medula-casca, e essas variações influenciam diretamente nas propriedades do material. Essa variabilidade se deve ao fato de que as espécies apresentam estruturas internas distintas, com ocorrência de elementos anatômicos em diferentes tamanhos e proporções, e nos mais variados arranjos estruturais, assim como pela complexa combinação, quantidade e distribuição dos componentes químicos no lenho (BOWYER; SHMULSKY; HAYGREEN, 2007).

Zobel e Bujtenen (1989) afirmaram que as características morfológicas das fibras variam significativamente entre e dentro das árvores e podem ser controladas geneticamente, bem como apresentar alterações, em função de diferentes práticas silviculturais e da alteração da idade de corte.

Segundo Moreira (1999), o lenho das árvores é constituído por diferentes tipos de células. As folhosas (caso de estudo) apresentam uma grande variação nos tipos e arranjos celulares. Segundo Dadswell (1972), o comprimento das fibras, vasos e células do parênquima axial é diretamente influenciado pelas divisões das células iniciais fusiformes no câmbio, tais células que são responsáveis por originar os elementos dispostos no sentido longitudinal do fuste.

Segundo Andrade (1987), as células cambiais passam a produzir, durante certo tempo, elementos com maiores dimensões até atingirem tabilização, por isso tende a existir aumento no comprimento das fibras no sentido medula-casca, com o aumento da idade. Assim, as fibras localizadas nas camadas de crescimento, mais próximas da medula e a certo nível do tronco, apresentam menores dimensões do que aquelas localizadas nas camadas finais de crescimento, mais próximas da casca. Hans e Burley (1972), estudando diversas

espécies de eucalipto, verificaram que há variação crescente no comprimento das fibras, no sentido medula-casca, até atingir um valor constante, a partir de certa idade (9 anos).

3.3 Carvão vegetal

Segundo Quadros (2005), o resultado da carbonização da madeira é um produto sólido com as seguintes características: coloração negra brilhante, poroso, de fácil combustão, capaz de gerar grande quantidade de calor e possui uma maior concentração de carbono do que o material que o originou.

O carvão vegetal é muito mais do que uma fonte de energia para o processo, ele ainda promove uma reação química denominada redução. Assim, o carvão vegetal é o principal insumo utilizado no setor siderúrgico sendo à base da produção de ferro gusa e constitui-se no item de maior custo, com participação superior a 50% na produção (CARVALHO; SOARES; VALVERDE, 2006).

No Brasil, a opção majoritária pela utilização do carvão vegetal na siderurgia se dá basicamente por dois fatores. O primeiro está ligado à baixa ocorrência de jazidas de carvão mineral de qualidade adequada no território nacional. Isso implica na necessidade da importação de carvão mineral de países produtores, caso seja a opção utilizá-lo na produção de ferro gusa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). O segundo fator refere-se aos fatores geográficos do Brasil, que conta com uma extensão territorial de dimensões continentais e características edafoclimáticas favoráveis à produção de madeira que, por sua vez, pode ser perfeitamente destinada à produção do carvão vegetal.

Segundo Lin (2006), o carvão vegetal é mais puro e apresenta propriedades químicas superiores, praticamente não possui enxofre, que é um poluente e contaminante do ferro gusa. Apresenta teores de cinzas dez vezes

menores, em relação ao coque, e produz dois terços a menos de escórias. Isso resulta em ferro gusa menos quebradiço, mais resistente e maleável. Entretanto, o carvão vegetal apresenta resistência mecânica bem inferior ao coque mineral, o que restringe muito a sua utilização nos altos fornos.

De acordo com Mendes, Gomez e Oliveira (1982), entre as propriedades desejáveis do carvão vegetal para a siderurgia, podem-se citar a composição química, densidade, tamanho médio de partículas e friabilidade, que estão ligadas à resistência mecânica do carvão, que é um fator importante no processo da fabricação do aço.

O estudo das propriedades do carvão vegetal acelera e impulsiona o mercado florestal e siderúrgico de forma contínua. O carvão é composto por três frações distintas: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.

A umidade vai depender da temperatura em que foi obtido e da umidade do ambiente ao qual ele está exposto; os materiais voláteis consistem na matéria volátil residual do carvão, que é composta, basicamente, de hidrogênio, hidrocarbonetos, CO e CO₂. O teor de cinzas refere-se ao resíduo de óxidos minerais obtidos pela combustão completa do carvão. O teor de carbono fixo é o restante apresentado no material, descontando o teor de cinzas e o teor de materiais voláteis (TRUGILHO; SILVA, 2001).

Segundo Trugilho et al. (2001), um problema relacionado à utilização do carvão vegetal é sua alta variabilidade em qualidade, uma vez que esse produto sofre grande influência da madeira que lhe deu origem e do sistema de produção. Essa variabilidade gera grandes perdas de material, pois dificulta sua utilização na siderurgia.

3.4 Importância do carvão vegetal para Minas Gerais

O Brasil é o primeiro produtor e consumidor mundial de carvão vegetal em escala industrial, o qual é destinado a vários segmentos como a siderurgia, metalurgia, cimento e residencial. No ano de 2013, houve um consumo na faixa dos 5,9 milhões de toneladas de carvão (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014).

O carvão vegetal é um insumo energético de grande importância econômica para o País, com ênfase especial na indústria siderúrgica, fornecendo energia e o redutor para aproximadamente 42% da produção nacional de ferro-gusa. Este, por sua vez, como insumo básico para a produção de aços e ferros fundidos, constitui a base de todo o desenvolvimento da chamada indústria metalúrgica, segmento importante da economia brasileira (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014).

Em 2013, a produção brasileira de ferro-gusa foi de 31,6 milhões de toneladas, diminuição de 2,5% em relação a 2012. Desse total, 83% da produção foram provenientes das usinas integradas, 17% representando as usinas independentes (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014).

No estado de Minas Gerais, está localizado o maior parque industrial brasileiro de ferro-gusa, formado por 62 indústrias, com capacidade de 7,6 milhões de toneladas/ano. Em 2013, a produção de Minas Gerais representou 55% do total da produção das usinas independentes. Parte da produção do Estado abastece o mercado interno e o restante é exportado, enquanto que a produção de Carajás, no Pará, é totalmente exportada (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014).

3.5 Parâmetros no processo de carbonização

Alguns parâmetros no processo de carbonização são triviais para o sucesso na produção do carvão vegetal. Dentre eles podemos citar a temperatura final de carbonização, taxa de aquecimento e pressão.

São muitas as reações químicas que ocorrem durante o processo de carbonização da madeira, e os fenômenos de reação estão estreitamente relacionados com a temperatura na qual a madeira é submetida (GOMES; OLIVEIRA, 1980). Cada faixa de temperatura é responsável por um tipo e quantidade de produto. Essas variações também estão relacionadas com as faixas de temperatura de degradação de cada componente da madeira.

Segundo Trugilho e Silva (2001), até 200°C há, predominantemente, a retirada de água da madeira. Nas temperaturas de 200-280°C, ocorre a fase endodérmica do processo, onde há a absorção do calor produzido no sistema e a liberação de, principalmente, ácido acético, metanol, água e dióxido de carbono. Entre 280 e 500°C tem-se o processo exotérmico onde, contrário a fase anterior, há a liberação de calor, liberando gases como o monóxido de carbono, metano e alcatrões. Acima dos 500°C, o carvão é bem estável e há a liberação de pequenas quantidades de voláteis, em especial o H₂.

Como regra geral, à medida que se eleva a temperatura de carbonização, aumentam de forma direta os rendimentos de líquido pirolenhoso e gases não-condensáveis, e de maneira inversa ocorre a diminuição do rendimento em carvão. Seguindo outro raciocínio, com o aumento da temperatura de carbonização, os voláteis vão se perdendo, incrementando as fases líquida e gasosa, com isso induz uma elevação no teor de carbono fixo e considerável melhora na qualidade do carvão vegetal (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2008).

O aumento na temperatura de carbonização causa diminuição do rendimento gravimétrico em carvão produzido, aumento nos produtos gasosos e aumento na concentração do carbono fixo (SYRED et al., 2006). A temperatura tem um efeito peculiar na densidade aparente do carvão, decrescendo, gradualmente, até as temperaturas na faixa dos 600°C.

Assim, a temperatura final de carbonização, é uma das variáveis responsáveis pela qualidade do carvão vegetal, desempenhando um papel fundamental nas diversas reações, durante o processo de carbonização, levando à geração de produtos com características físicas e químicas diferentes (TRUGILHO; SILVA, 2001).

A taxa de aquecimento ou velocidade de aquecimento também pode influenciar de forma considerável a qualidade do carvão vegetal, e esta pode ser definida como a velocidade de elevação da temperatura em um intervalo de tempo, durante o processo de carbonização da madeira (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2008).

Durante a carbonização da madeira, uma maior taxa de aquecimento tem grande influência em termos de rendimentos gravimétricos de seus produtos e também no teor de carbono fixo do carvão vegetal (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS, 1982).

Segundo Antal et al. (2000), baixas velocidades de aquecimento aumentam o rendimento de carvão formado a partir de celulose pura, em razão das baixas taxas de aquecimento favorecerem um dos caminhos de reação competitivos que preferencialmente produz a fração sólida (carvão).

Segundo Almeida (1983), quanto maior a taxa de aquecimento, maior será o grau de destilação do material, com o conseqüente aumento na quantidade de líquido e gás não-condensável, em contrapartida, ocorre uma redução no rendimento do produto sólido.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material biológico

A seleção dos materiais genéticos utilizados neste estudo foi realizada a partir de uma amostra piloto que continha um total de 14 materiais genéticos representados por um indivíduo cada. Os 14 genótipos foram caracterizados anatomicamente, por meio da mensuração das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume, espessura de parede e fração parede), raio (altura e largura) e elemento de vaso (comprimento, diâmetro e frequência). Com as informações da caracterização anatômica, foi realizada a análise de agrupamento e método hierárquico, que permitiu a separação dos 14 genótipos em três grupos distintos. De cada grupo formado, foi selecionado um material genético que fosse o mais representativo em função das características anatômicas médias. Os três materiais genéticos selecionados foram o VM04 e MN463 (clones de híbridos naturais do *Eucalyptus urophylla*) e o *Corymbia citriodora*.

Esses materiais, aos 6 anos de idade, plantados em espaçamentos de 3x3 m, provenientes da empresa Vallourec Florestal Ltda., localizada em Paraopeba – MG, foram utilizados no presente estudo.

4.2 Amostragem e preparo do material

Para melhor representatividade no trabalho, foram selecionadas e abatidas 5 árvores por clone, com diâmetro médio de 16 cm.

Após o abate das árvores, foi feita a medição da altura comercial do fuste e demarcadas as seções em 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Nessas posições

de amostragem, foram retirados toretes de 100 cm de comprimento, para as análises na Universidade Federal de Lavras, conforme mostrado na Figura 1.

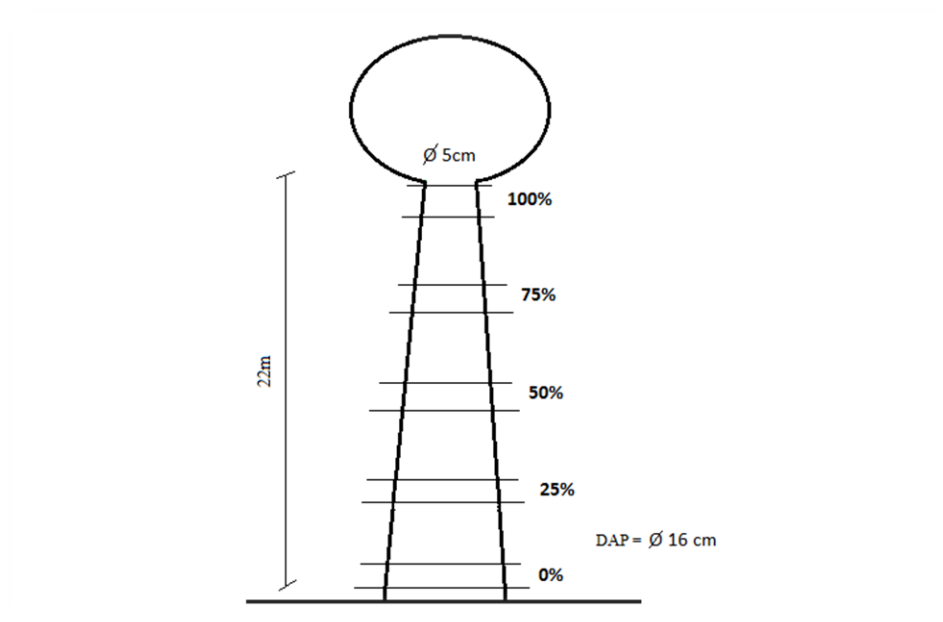


Figura 1 Esquema ilustrativo da amostragem realizada

Nos toretes foram retirados dois discos na porção central dos mesmos, em que um dos discos foi destinado à análise da anatomia e o outro para análise da interferência da posição radial na carbonização da madeira.

As dimensões dos corpos de prova destinados para a avaliação da anatomia foram de 1x1x1 cm e, para verificar o efeito da posição radial da madeira na carbonização, utilizaram-se amostras de dimensões de 3x2x2 cm. Para o efeito da posição longitudinal, foram feitas as médias ponderadas (proporção cerne e alburno) dos corpos de prova da posição radial ao longo do fuste.

As carbonizações para a avaliação do efeito das posições radial e longitudinal foram realizadas em forno elétrico (mufla) adaptado. O

aquecimento foi monitorado por controlador eletrônico, o qual permitiu controlar a taxa de aquecimento de forma precisa, sendo de $1,0^{\circ}\text{C min}^{-1}$. A temperatura inicial de aproximadamente 25°C e a temperatura máxima de 400°C , permanecendo estabilizada por 30 minutos. Os corpos de prova foram carbonizados com umidade média de aproximadamente 32%.

4.3 Rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico da carbonização foi determinado pela razão entre a massa de carvão vegetal seco pela massa seca de madeira enforada, expresso em porcentagem.

4.4 Análise química imediata

Foram realizadas as análises químicas imediatas nos carvões produzidos, visando à determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, de carbono fixo, conforme procedimento estabelecido na Norma NBR 8112 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983).

4.5 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior foi realizado segundo a norma NBR 8633 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984).

4.6 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente foi realizada pelo método de imersão em água.

4.7 Densidade de energia

A densidade de energia é o produto entre o poder calorífico superior pela densidade relativa aparente.

4.8 Caracterização anatômica da madeira

Para o preparo do macerado, foi utilizada a metodologia descrita por Franklin (1945). As amostras para a preparação do macerado foram retiradas dos corpos de prova com dimensões lineares de 1,0 x 1,0 x 1,0cm. As características anatômicas avaliadas foram: comprimento da fibra, largura da fibra, diâmetro do lume da fibra, espessura da parede da fibra (Equação 1), fração parede da fibra (Equação 2), índice de esbelteza (Equação 3), coeficiente de flexibilidade (Equação 4) e índice de Runkel (Equação 5). Em cada parâmetro avaliado, foram realizadas 30 medições por amostra.

$$EPA = \frac{Lf - \emptyset lum}{2} \quad (1)$$

$$FP = \frac{Lf - \emptyset lum}{Lf} \times 100 \quad (2)$$

$$IE = \frac{Cf}{Lf} \quad (3)$$

$$CF = \frac{\emptyset lum}{Lf} \times 100 \quad (4)$$

$$IR = \frac{Lf - \emptyset lum}{\emptyset lum} \quad (5)$$

Em que: EPA: espessura da parede da fibra (μm); Lf: largura da fibra (μm), \O lum : diâmetro do lume (μm); FP: fração parede da fibra (%); IE: índice de esbelteza; Cf: comprimento da fibra (μm); CF: Coeficiente de flexibilidade (%) e IR: índice de Runkel.

4.9 Análise estatística dos dados

Na avaliação do experimento, foi adotado o delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições (árvores). Foi utilizada a análise de regressão linear para o ajuste de modelo linear visando ao estabelecimento das relações funcionais entre as posições longitudinais da árvore (variável quantitativa) e a qualidade e a produção do carvão vegetal. Foram também determinadas as correlações de Pearson entre as características de qualidade dos carvões obtidos pelas posições radiais com as características das fibras da madeira e os seus índices de qualidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a apresentação e discussão dos resultados obtidos, optou-se em utilizar, separadamente, três tópicos principais: (5.1) caracterização do carvão vegetal produzido de cerne, alburno e posição longitudinal de amostragem; (5.2) caracterização das fibras e do carvão vegetal nas diferentes posições longitudinais de amostragem; e (5.3) correlação entre as características morfológicas das fibras e as do carvão vegetal.

5.1 Caracterização do carvão vegetal produzido de cerne, alburno e posição longitudinal de amostragem

Na Tabela 1, apresenta-se o resumo da análise de variância para as características de rendimento gravimétrico em carvão e análise química imediata. Verifica-se que o rendimento gravimétrico da carbonização apresentou efeito significativo de material genético (MG), posição longitudinal (PL) e radial (PR) e a interação entre material genético e posição longitudinal de amostragem.

Interação significativa indica a existência de dependência entre os fatores e, portanto, deve-se fazer o seu desdobramento e avaliação de um efeito dentro do outro. Dessa forma, optou-se por fazer o desdobramento da interação e avaliar o efeito de material genético dentro de posição longitudinal de amostragem e vice-versa.

A avaliação do desdobramento da interação e avaliação do efeito de material genético dentro dos níveis de posição longitudinal de amostragem mostrou que não existe diferença significativa para o rendimento gravimétrico em carvão entre os materiais genéticos dentro da posição longitudinal 0% (base da árvore), enquanto que para 25 e 50% existe diferença significativa entre os materiais genéticos (Tabela 2).

Tabela 1 Resumo da análise de variância para rendimento em carvão e análise química imediata

Fonte de Variação	GL	QM			
		RGC	TMV	TCZ	TCF
(MG)	2	113,439 *	42,111853 ^{ns}	0,00942 ^{ns}	41,0891 ^{ns}
(PL)	2	512,072 *	53,998253 ^{ns}	0,125074 ^{ns}	58,9696 ^{ns}
(PR)	1	371,978 *	1,869121 ^{ns}	0,057254 ^{ns}	2,58471 ^{ns}
MG*PL	4	29,9967 *	7,267567 ^{ns}	0,133214 ^{ns}	7,0906 ^{ns}
MG*PR	2	0,35924 ^{ns}	4,565231 ^{ns}	0,053274 ^{ns}	3,84364 ^{ns}
PL*PR	2	7,87465 ^{ns}	28,23803 ^{ns}	0,367734 ^{ns}	34,5945 ^{ns}
MG*PL*PR	4	9,08038 ^{ns}	28,94100 ^{ns}	0,09004 ^{ns}	25,9132 ^{ns}
Erro	72	10,644697	23,646648	0,120604	22,684746
CVe (%)		8,34	17,31	47,19	6,69
Média geral		39,11	28,08	0,73	71,18

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão (%); TMV: Teor de materiais voláteis (%); TCZ: Teor de cinzas (%); TCF: Teor de carbono fixo (%); GL: Graus de liberdade; CVe (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Tabela 2 Desdobramento da interação entre material genético dentro de posição longitudinal

MG	0%		25%		50%	
Citriodora	42,54	A	39,68	B	36,33	A
MN 463	43,39	A	35,62	B	31,96	B
VM 04	43,90	A	41,80	A	36,74	A

A avaliação do desdobramento da interação (MG x PL) e avaliação do efeito de posição longitudinal dentro de material genético mostrou que o efeito de posição longitudinal (PL) foi significativo para todos os materiais genéticos. Dessa forma, obteve-se a análise de regressão e foi ajustado o modelo linear simples para verificar a relação funcional existente entre a posição longitudinal de amostragem na árvore e o rendimento gravimétrico em carvão (Figuras 2, 4 e 6). Nas Figuras 3, 5 e 7 mostram a distribuição residual observada para os modelos ajustados.

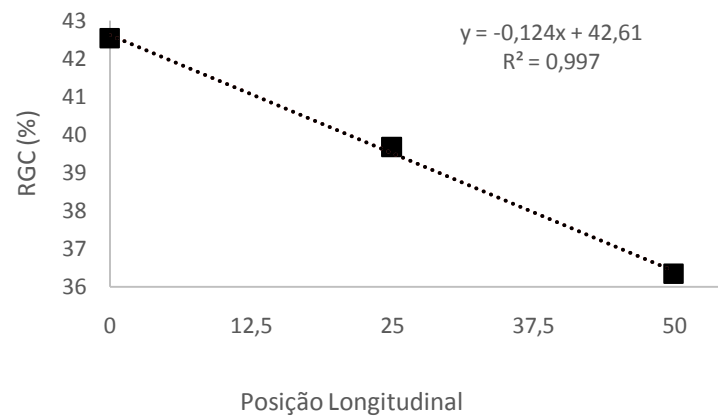


Figura 2 Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem para o *C. citriodora*

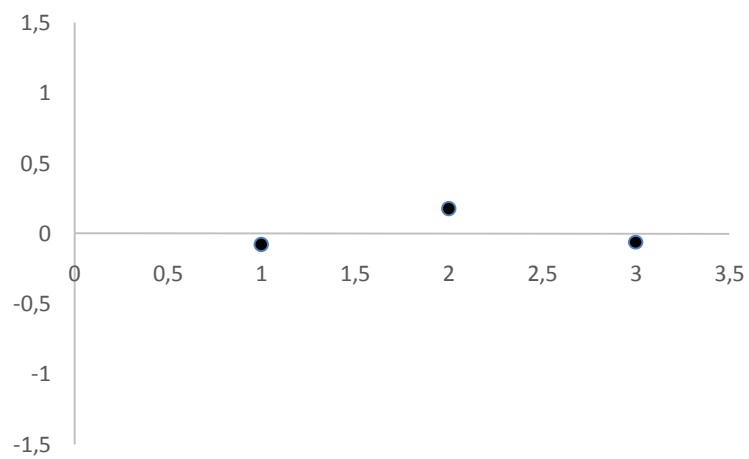


Figura 3 Distribuição residual do modelo ajustado para o *C. citriodora*

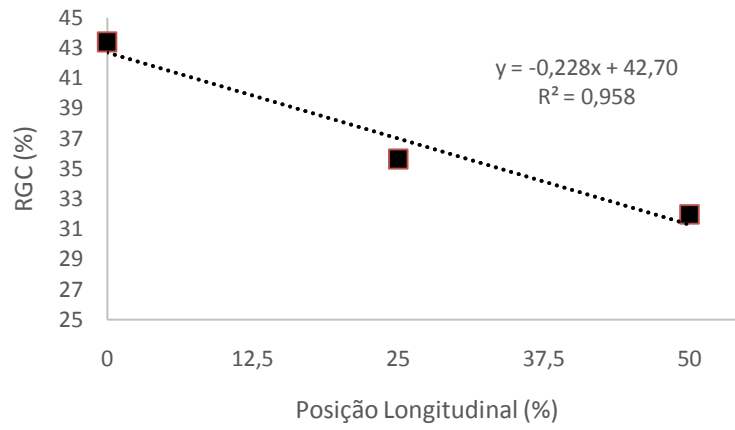


Figura 4 Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem para o MN 463

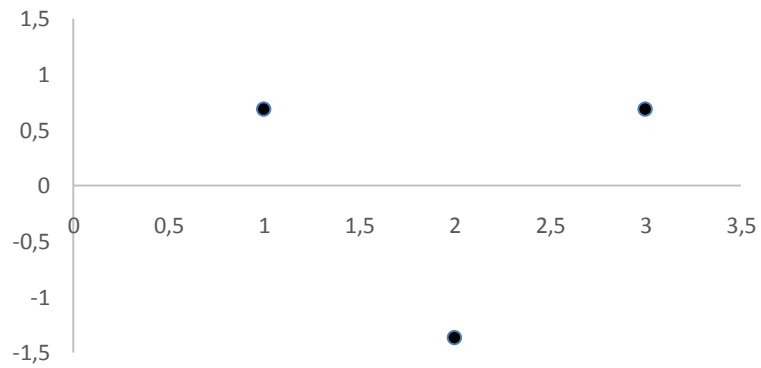


Figura 5 Distribuição residual do modelo ajustado para o MN 463

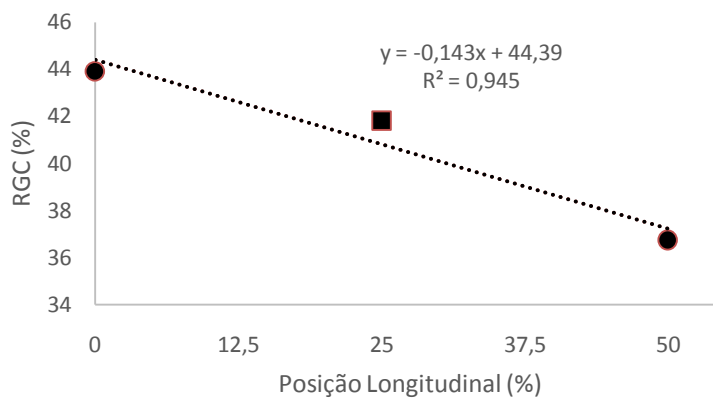


Figura 6 Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem para o VM 04

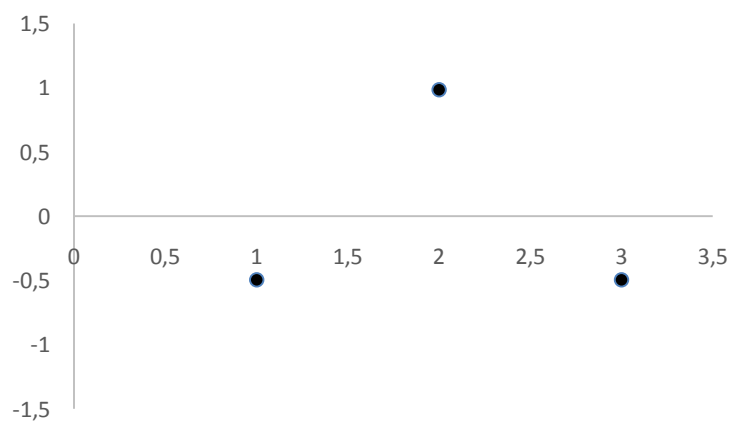


Figura 7 Distribuição residual do modelo ajustado para o VM 04

Pelas Figuras 2, 4 e 6, verifica-se a tendência de redução do rendimento gravimétrico com o aumento da posição longitudinal de amostragem para todos os materiais genéticos. Pode-se observar ainda que o *C. citriodora* apresentou o melhor ajuste do modelo e uma melhor distribuição residual (Figura 3) que os clones híbridos do *E. urophylla*.

Na Tabela 3, apresentam-se os valores médios de rendimento gravimétrico em carvão dos clones para as posições radiais. Observa-se que o carvão produzido pelo cerne apresentou maior rendimento comparado ao alburno. Estudo semelhante foi feito por Couto (2014), quando o autor observou uma produção de 38,05% de rendimento gravimétrico para a madeira de cerne e 34,86% para o alburno, em uma temperatura de carbonização de 450°C. O autor justificou a diferença, em razão da discordância no teor de lignina na madeira presente nas posições radiais distintas. A lignina é o composto orgânico com maior termorresistência presente nos materiais lenhosos, ou seja, a degradação desta macromolécula pelo incremento da temperatura é mais lenta e dificultosa comparada aos demais compostos orgânicos que compõem a madeira (SARKANEN; LUDWIG, 1971). Portanto, o processo de carbonização, quando se utiliza madeiras com maior teor em lignina, tende a apresentar um maior rendimento (GOLDSTEIN, 1977).

Tabela 3 Valores médios de rendimento gravimétrico em carvão dos materiais genéticos em cada posição radial

PR	RGC (%)	
Alburno	37,07	B
Cerne	41,14	A

Esse resultado (Tabela 3), mostra que, para aumentar o rendimento em carbonização, é importante considerar a relação cerne/alburno, onde maiores relações favorecerão ao processo produtivo.

Para as características químicas do carvão (Tabela 1), não foi observado nenhum efeito significativo. Esse fato deve estar associado à temperatura de carbonização, uma vez que, no presente estudo, foi a mesma para todos os materiais genéticos. Esse mesmo resultado foi observado por Botrel et al. (2007).

Na Tabela 4, mostra-se o resumo da análise de variância para a densidade relativa aparente, poder calorífico superior e densidade de energia. Verificou-se que nenhuma das interações apresentou significância. Houve efeito significativo de materiais genéticos, posição longitudinal e posição radial, para a densidade relativa aparente; de material genético e posição radial, para o poder calorífico superior; e de material genético e posição longitudinal, para a densidade de energia.

Tabela 4 Resumo da análise de variância para densidade relativa aparente, poder calorífico superior e densidade de energia

Fonte de Variação	GL	QM		
		DRA	PCS	DE
MG	2	0,224578 *	271532,01 *	4,739204 *
PL	2	0,015144 *	851,41111 ^{ns}	0,535048 *
PR	1	0,011995 *	105336,01 *	0,161290 ^{ns}
MG*PL	4	0,000748 ^{ns}	53512,8444 ^{ns}	0,056983 ^{ns}
MG*PR	2	0,001615 ^{ns}	1944,7444 ^{ns}	0,004413 ^{ns}
PL*PR	2	0,000118 ^{ns}	113,01111 ^{ns}	0,000203 ^{ns}
MG*PL*PR	4	0,000218 ^{ns}	1752,1444 ^{ns}	0,002132 ^{ns}
Erro	72	0,001842	23359,37222	0,070261
	CVe (%)	11,25	2,23	14,06
	Média geral	0,381	6852	2,62

DRA: Densidade relativa aparente (g/cm³); PCS: Poder calorífico superior (cal/g); DE: Densidade de energia (Gcal/cm³); GL: Graus de liberdade; CVe (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Na Tabela 5, apresentam-se os valores médios do poder calorífico superior para os materiais genéticos avaliados. Verificou-se que somente o clone MN 463 obteve um poder calorífico superior, diferente estatisticamente dos demais. Segundo Couto (2014), avaliando esses mesmos materiais genéticos e carbonização nas temperaturas de 450 e 550°C, o poder calorífico superior do clone MN 463 também foi o menor de todos.

Tabela 5 Valores médios do poder calorífico superior (PCS) dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	PCS (cal/g)	
MN 463	6746	B
Citriodora	6880	A
VM 04	6930	A

Na Tabela 6, encontram-se os valores médios do poder calorífico superior em função da posição radial. Verificou-se que no alburno foi observado poder calorífico superior ligeiramente maior que no cerne, sendo estatisticamente diferentes entre si.

Tabela 6 Valores médios de poder calorífico superior (PCS) dos materiais genéticos nas posições radiais de amostragem

PR	PCS (cal/g)	
Cerne	6818	B
Alburno	6886	A

Para a densidade relativa aparente observou-se que somente o *C. citriodora* diferiu estatisticamente dos dois clones, apresentando uma densidade mais alta em relação ao MN 463 e o VM 04 (Tabela 7).

Tabela 7 Valores médios de densidade relativa aparente (DRA) dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	DRA (g/cm ³)	
MN 463	0,342	B
Citriodora	0,481	A
VM 04	0,322	B

Para a análise da densidade relativa aparente nas posições radiais, o cerne apresentou uma ligeira queda em relação ao alburno (Tabela 8). Os perfis radiais de densidade aparente do carvão atendem ao modelo de variação indicado na literatura por vários autores, caracterizado pela menor densidade no lenho próximo à medula e aumentando em direção à casca (TRUGILHO et al., 2005; SILVA, 2001, TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

Tabela 8 Valores médios de densidade relativa aparente (DRA) dos materiais genéticos em cada posição radial

PR	DRA (g/cm ³)	
Cerne	0,370	B
Alburno	0,393	A

Na Figura 8, apresenta-se o modelo linear ajustado para a densidade relativa aparente do carvão vegetal em função da posição longitudinal da árvore. Observou-se que quanto mais próximo à base do fuste maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal e com o aumento da posição longitudinal a tendência foi de redução da densidade relativa aparente do carvão. Contrário a esse estudo apresentado, Costa (2006), utilizando clones de *E. grandis* verificou o aumento da densidade do carvão do lenho na direção base-topo.

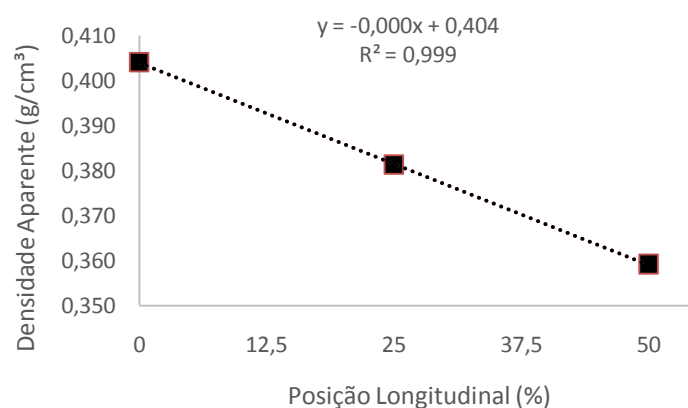


Figura 8 Relação funcional entre a posição longitudinal de amostragem e a densidade relativa aparente do carvão

Para a densidade de energia, o *C. Citriodora* apresentou a maior densidade de energia do que os demais materiais genéticos, enquanto que os clones MN 463 e VM 04 não se diferiram estatisticamente (Tabela 9).

Tabela 9 Valores médios de densidade de energia dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	DE (Gcal/cm³)	
Citriodora	3,31	A
MN 463	2,31	B
VM 04	2,23	B

Na Figura 9, mostra-se o modelo linear ajustado entre a densidade de energia e a posição longitudinal de amostragem na árvore. Verifica-se que a tendência foi de aumento da densidade de energia com a posição longitudinal de amostragem na árvore.

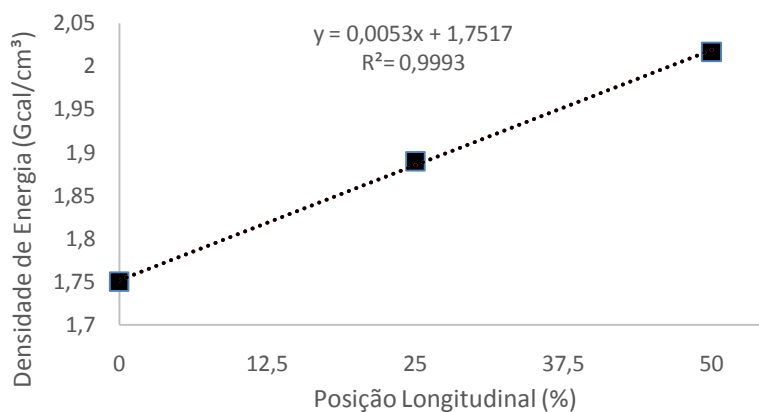


Figura 9 Relação funcional entre a densidade de energia e a posição longitudinal de amostragem na árvore

5.2 Caracterização das fibras e do carvão vegetal nas diferentes posições longitudinais de amostragem

Na Tabela 10, apresenta-se o resumo da análise de variância para as características dimensionais das fibras. Verifica-se que o efeito de material genético (MG) e a posição longitudinal de amostragem foram significativos para todas as características dimensionais das fibras, porém a interação foi não significativa.

Na Tabela 11, encontram-se os valores médios dimensionais das fibras e a classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott ($\alpha=0,05$). Observa-se que o *C. citriodora* apresentou o maior comprimento e a maior espessura da parede celular, sendo estatisticamente diferente dos clones híbridos do *E. urophylla*, além da menor largura e menor diâmetro do lume das fibras. Para a largura e diâmetro do lume das fibras, o clone VM 04 apresentou os maiores valores e o MN 463 valores intermediários.

Tabela 10 Resumo da análise de variância para as características dimensionais das fibras

Fonte de Variação	GL	QM			
		C. Fibra	L. Fibra	D. Lume	E. Parede
MG	2	0,09792*	49,25738*	100,2562*	2,53520*
PL	4	0,18360*	14,63752*	3,113878 *	5,80627*
MG*PL	8	0,01207 ^{ns}	2,09436 ^{ns}	0,303077 ^{ns}	0,25541 ^{ns}
Erro	60	0,013934	2,677517	1,198379	0,263585
	CVe (%)	14,75	11,52	22,15	11,09
	Média geral	0,80	14,20	4,94	4,63

C. Fibra: comprimento da fibra (mm); L. Fibra: largura da fibra (μm); D. Lume: diâmetro do lume (μm); E. Parede: espessura da parede (μm) GL: Graus de liberdade; CVe (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Tabela 11 Valores médios para as características dimensionais das fibras e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	C. Fibra	L. Fibra	D. Lume	E. Parede
VM 04	0,76 B	15,73 A	6,66 A	4,44 B
MN 463	0,76 B	14,33 B	5,42 B	4,45 B
Citriodora	0,87 A	12,73 C	2,74 C	5,00 A

C. Fibra: comprimento da fibra (mm); L. Fibra: largura da fibra (μm); D. Lume: diâmetro do lume (μm); E. Parede: espessura da parede celular (μm).

Nas Figuras 10, 11, 12 e 13 mostra-se a relação funcional existente entre as dimensões das fibras e a posição longitudinal de amostragem no fuste das árvores. Observa-se que a tendência de variação foi de redução linear do comprimento, largura e espessura da parede da fibra em função da posição longitudinal de amostragem, enquanto que o diâmetro do lume apresentou comportamento contrário. Os modelos lineares simples ajustados apresentaram elevados coeficientes de determinação para o comprimento ($r^2 = 0,9894$), largura ($r^2 = 0,8273$) e espessura da parede celular das fibras ($r^2 = 0,9874$), indicando a qualidade do ajuste dos modelos. O diâmetro do lume das fibras apresentou uma qualidade mediana de ajuste do modelo de regressão ($r^2 = 0,5594$). Notou-se que

quanto mais próximo da base da árvore maiores foram os comprimentos, largura e espessura da parede celular e menores os diâmetros do lume das fibras. Esse fato está relacionado à maior densidade básica da madeira, que, normalmente, é maior na base da árvore.

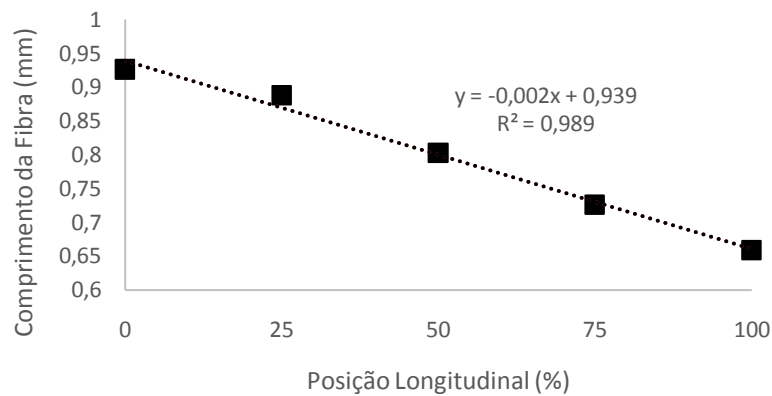


Figura 10 Relação funcional entre o comprimento das fibras e a posição longitudinal de amostragem

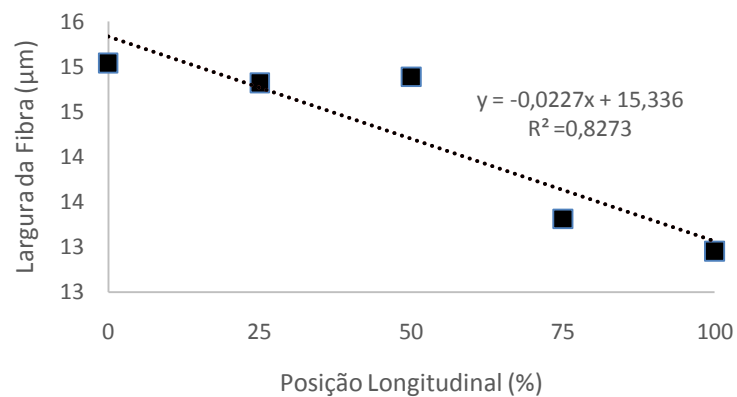


Figura 11 Relação funcional entre a largura da fibra e a posição longitudinal de amostragem na árvore

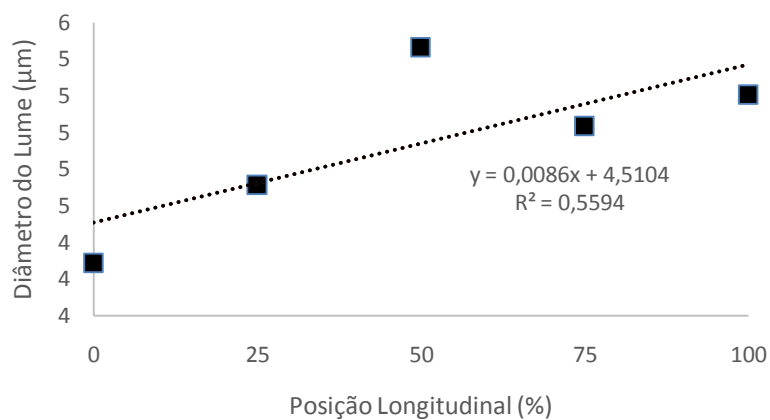


Figura 12 Relação funcional entre o diâmetro do lume e a posição longitudinal de amostragem na árvore

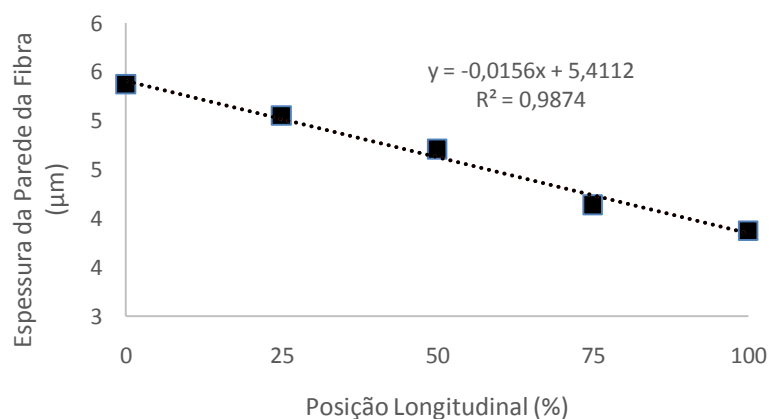


Figura 13 Relação funcional entre a espessura da parede da fibra e a posição longitudinal de amostragem na árvore

Floresheim et al. (2000), estudando a variação radial e longitudinal da estrutura anatômica da madeira de árvores de *Eucalyptus saligna*, de 7 anos, constataram no sentido radial o aumento do comprimento, diâmetro e espessura da parede das fibras, com diminuição do seu diâmetro do lume.

Hillis (1972) observou diminuição do comprimento das fibras ao longo do eixo longitudinal para o gênero *Eucalyptus*, entretanto Quilhó, Miranda e Pereira (2006) encontraram pouca variação nas dimensões das fibras no sentido longitudinal em híbridos de *E. urophylla* com *E. grandis*.

Alguns resultados controversos encontrados na literatura certamente podem estar associados ao material genético, sítio, fatores ambientais, posição de amostragem e idade.

Segundo Santos et al. (2011), os valores observados em seu trabalho com eucalipto encontraram valores para largura entre 16,82 e 20,02 μm , do diâmetro do lume entre 8,93 e 9,38 μm e da espessura da parede entre 3,94 e 5,25 μm . Comprovando que os valores obtidos no presente estudo estão de acordo com a literatura acima citada.

Na Tabela 14, apresenta-se o resumo da análise de variância para os índices de qualidade das fibras da madeira. Observa-se que todos os índices de qualidade apresentaram efeito significativo de material genético e posição longitudinal de amostragem, mesmo resultado obtido para as características dimensionais das fibras.

Na Tabela 15, apresentam-se os valores médios e a classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott ($\alpha=0,05$). Observa-se que o *C. citriodora* apresentou o maior índice de esbelteza, índice de Runkel e a maior fração parede, sendo estatisticamente diferente dos clones híbridos do *E. urophylla*, além do menor coeficiente de flexibilidade. O clone VM 04 apresentou o maior valor do coeficiente de flexibilidade e a menor fração parede. Observou-se que o clone MN 463 obteve valores do índice de qualidade intermediários em relação aos outros materiais genéticos.

Tabela 12 Resumo da análise de variância para índices os de qualidade das fibras da madeira

Fonte de Variação	GL	QM			
		IE	CF	IR	FP
MG	2	2543,761*	3124,18*	64,113*	3124,189*
PL	4	379,1405*	375,661*	9,3698*	375,6613*
MG*PL	8	70,80347 ^{ns}	4,886716 ^{ns}	2,69851 ^{ns}	4,886716 ^{ns}
Erro	60	131,891755	27,302395	1,692089	27,3024
CVe (%)		19,94	15,32	52,28	7,93
Média geral		57,58	34,10	2,49	65,90

IE: Índice de esbelteza; CF: Coeficiente de flexibilidade (%); FP: fração parede (%); IR: Índice de Runkel; GL: Graus de liberdade; CVe (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Tabela 13 Valores médios para os índices de qualidade da fibra dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	IE		CF (%)		FP (%)		IR	
Citriodora	68,87	A	21,53	C	78,47	A	4,32	A
MN 463	54,45	B	37,86	B	62,14	B	1,78	B
VM 04	49,44	B	42,92	A	57,08	C	1,37	B

IE: Índice de esbelteza (%); CF: Coeficiente de flexibilidade; FP: fração parede; IR: Índice de Runkel.

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 mostra-se a relação funcional existente entre os índices de qualidade das fibras e a posição longitudinal de amostragem no fuste das árvores. Observa-se que a tendência de variação foi de redução linear da fração parede, índice de esbelteza e de Runkel em função da posição longitudinal de amostragem, enquanto que o coeficiente de flexibilidade apresentou comportamento contrário. Na fração parede o comportamento apresentado seguiu o mesmo comportamento da espessura da parede e a largura da fibra. O índice de esbelteza do modelo tende a diminuir, em razão da diminuição do comprimento e largura da fibra com a altura da árvore. O coeficiente de flexibilidade teve um aumento no sentido base-topo, mesmo

comportamento observado pelo diâmetro do lume, porém contrário ao comportamento da largura da fibra, enquanto que o índice de Runkel teve uma queda no sentido base-topo, apresentando similaridade com o comportamento da espessura da parede e contrário ao comportamento do lume da fibra. Os modelos lineares simples ajustados apresentaram elevados coeficientes de determinação para a fração parede ($r^2 = 0,9642$), índice de esbelteza ($r^2 = 0,9099$) índice de Runkel ($r^2 = 0,9874$) e coeficiente de flexibilidade ($r^2 = 0,9642$) indicando a qualidade do ajuste dos mesmos. Notou-se que, quanto mais próximas da base, as fibras são mais rígidas e mais flexíveis no topo das árvores.

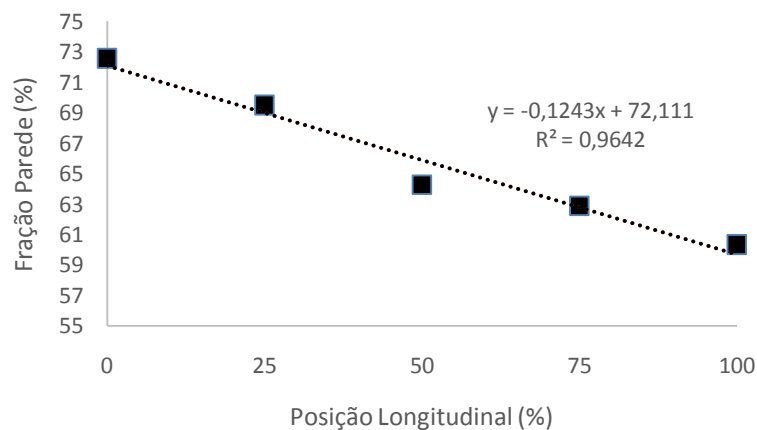


Figura 14 Relação funcional entre a fração parede da fibra e a posição longitudinal de amostragem

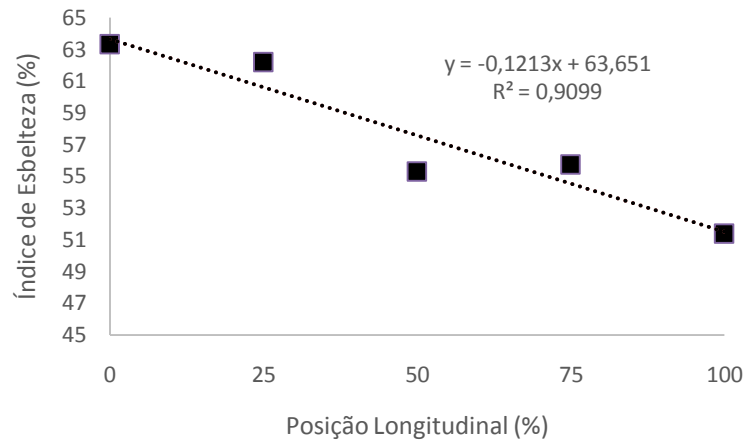


Figura 15 Relação funcional entre o índice de esbelteza e a posição longitudinal de amostragem

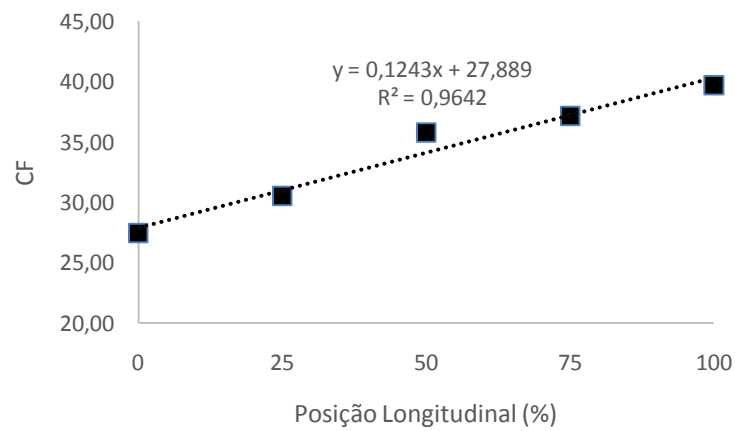


Figura 16 Relação funcional entre o coeficiente de flexibilidade e a posição longitudinal de amostragem

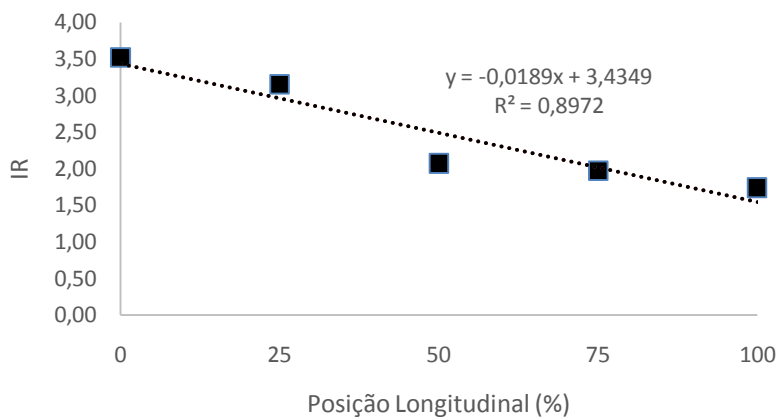


Figura 17 Relação funcional entre o índice de Runkel e a posição longitudinal de amostragem

No trabalho realizado por Rocha, Floresheim e Couto (2004), os resultados obtidos para índice de Runkel mostram tendências de aumentarem da base para o topo na árvore.

Florsheim (2009) encontrou maiores valores do índice de Runkel na posição mais baixa do tronco, o valor menor valor foi de 0,84 e o máximo de 1,03.

Em estudos realizados por Valente et al. (2013), com *Anadenanthera peregrina*, foi observado que, para a fração parede, os valores encontrados foram semelhantes entre si no sentido longitudinal do tronco, não havendo, assim, diferença estatística significativa.

Na Tabela 16, apresenta-se o resumo da análise de variância para as características de rendimento gravimétrico e análise química imediata do carvão produzido. Observou-se efeito significativo de material genético e posição longitudinal de amostragem no fuste das árvores apenas no rendimento

gravimétrico em carvão. As características químicas do carvão apresentaram todos os efeitos não significativos.

Na Tabela 14, estão apresentados os valores médios e a classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott ($\alpha=0,05$). Observa-se que o *C. citriodora* e o clone VM 04 apresentaram os maiores valores de rendimento gravimétrico em carvão, sendo, estatisticamente, iguais, enquanto que o clone MN 463 apresentou o menor valor e, estatisticamente, diferente dos demais materiais genéticos.

Tabela 14 Resumo da análise de variância para rendimento gravimétrico em carvão e análise química imediata

Fonte de Variação	GL	QM			
		RGC	TMV	TCZ	TCF
MG	2	101,909*	13,0010 ^{ns}	0,0047 ^{ns}	13,4424 ^{ns}
PL	4	394,505*	46,5000 ^{ns}	0,0922 ^{ns}	43,0989 ^{ns}
MG*PL	8	9,06415 ^{ns}	15,5679 ^{ns}	0,10084 ^{ns}	13,825331 ^{ns}
Erro	60	6,599555	24,115845	0,082823	23,473503
CVe (%)		7,12	18,00	36,89	6,73
Média geral		36,09	27,27	0,78	71,95

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão (%); TMV: Teor de materiais voláteis (%); TCZ: Teor de cinzas (%); TCF: Teor de carbono fixo (%); GL: Graus de liberdade; CVe (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Tabela 15 Valores médios de rendimento em carvão dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	RGC (%)	
VM 04	37,65	A
MN 463	33,81	B
Citriodora	36,81	A

Na Figura 18, mostra-se a relação funcional existente entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem no fuste das árvores. Nota-se que há tendência de redução do rendimento gravimétrico em carvão em função da posição longitudinal de amostragem. O modelo linear ajustado apresentou elevado coeficiente de determinação ($r^2 = 9483$), evidenciando a qualidade do seu ajuste.

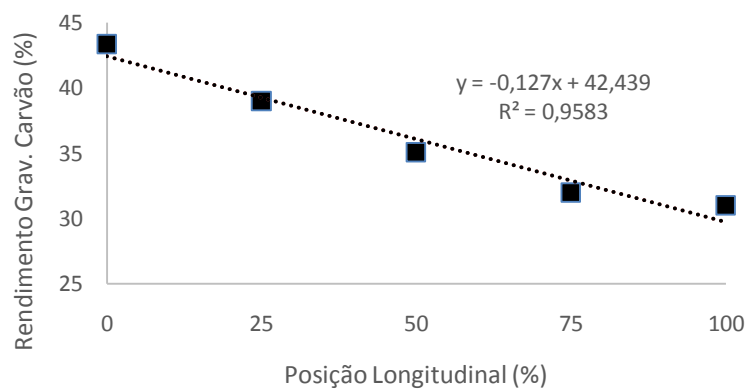


Figura 18 Relação funcional entre o rendimento gravimétrico em carvão e a posição longitudinal de amostragem

Na Tabela 16, está apresentado o resumo da análise de variância para poder calorífico superior (PSC), densidade relativa aparente (DRA) e densidade

de energia (DE). Observa-se que o efeito de material genético foi significativo para todas as características avaliadas, porém o efeito de posição longitudinal de amostragem somente foi significativo para a DRA e DE.

Na Tabela 17, apresentam-se os valores médios e a classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott ($\alpha=0,05$). Observa-se que o clone MN 463 obteve o menor valor médio de PCS, sendo, estatisticamente, diferente dos demais materiais genéticos. O *C. citriodora* e o clone VM 04 não apresentaram diferença estatística significativa para o PCS.

Tabela 16 Resumo da análise de variância para poder calorífico superior densidade relativa aparente e densidade de energia

Fonte de Variação	GL	QM		
		PCS	DRA	DE
MG	2	93520,440 *	0,17095 *	4,9647 *
PL	4	25451,780 ^{ns}	0,03044 *	1,1885 *
MG*PL	8	20810,090 ^{ns}	0,00170 ^{ns}	0,1109 ^{ns}
Erro	60	10290,82667	0,000856	0,075573
	CVe (%)	1,48	8,26	13,34
	Média geral	6859	0,354	2,43

PCS: poder calorífico superior (cal/g); DRA: densidade relativa aparente (g/cm³); DE: densidade de energia (Gcal/cm³); GL: Graus de liberdade; CVe (%): Coeficiente de variação experimental; ns: Não significativo a 0,05 de significância; *: Significativo a 0,05 de significância.

Tabela 17 Valores médios de poder calorífico superior dos materiais e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	PCS (cal/g)	
VM 04	6910	A
MN 463	6791	B
Citriodora	6875	A

Na Tabela 18, estão apresentados os valores médios e a classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott ($\alpha=0,05$), para a densidade relativa aparente (DRA) e a densidade de energia (DE). Observa-se que para a DRA, o *C. citriodora* obteve o maior valor, diferindo dos demais materiais genéticos, enquanto que para a DE os clones VM 04 e MN 463 apresentaram os menores valores médios, não diferiram estatisticamente. O *C. citriodora* apresentou o maior valor médio e estatisticamente diferente dos dois clones.

Tabela 18 Valores médios de densidade relativa aparente e densidade de energia dos materiais genéticos e classificação segundo teste comparação múltipla de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$)

MG	DRA (g/cm ³)		DE (Gcal/cm ³)	
VM 04	0,299	B	2,07	B
MN 463	0,314	B	2,13	B
Citriodora	0,449	A	3,09	A

Nas Figuras 19 e 20, mostra-se a relação funcional existente entre densidade relativa aparente e a densidade de energia, de acordo com a posição longitudinal de amostragem no fuste das árvores. Observa-se que a tendência de variação foi de redução linear da densidade relativa aparente do carvão, enquanto que a densidade de energia apresentou comportamento contrário. Os modelos lineares simples ajustados apresentaram elevados coeficientes de determinação, para a densidade relativa aparente ($r^2 = 0,9302$) e densidade de energia ($r^2 = 0,9356$), indicando a qualidade do ajuste dos mesmos.

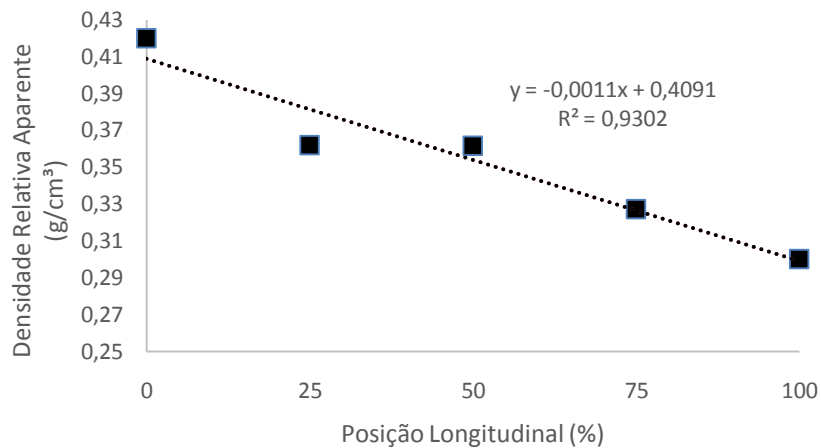


Figura 19 Relação funcional entre a densidade relativa aparente e a posição longitudinal de amostragem

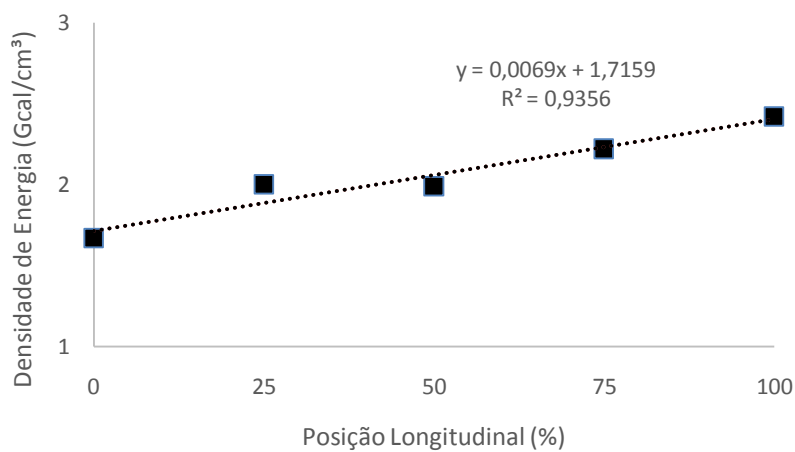


Figura 20 Relação funcional entre a densidade de energia e a posição longitudinal de amostragem

Pereira, Schaitza e Baggio (2000), ao estudarem as características do carvão de cinco espécies de eucalipto, aos dez anos e meio de idade,

encontraram valores para o poder calorífico superior do carvão variando de 6.626 e 8.088 kcal/kg. Santos (2008) afirma que o poder calorífico do carvão vegetal se encontra próximo de 7.500 kcal/kg. Frederico (2009) encontrou valores para essa propriedade entre 8.129 e 8.389 kcal/kg. Neste trabalho, os valores ficaram um pouco abaixo dos referenciados na literatura, porém deve-se levar em consideração o efeito da temperatura final de carbonização que, neste estudo, foi de 400°C.

Verificou-se que há tendência de decréscimo da DRA no sentido base-topo, em que a madeira carbonizada próxima à base tende a produzir um carvão vegetal mais denso (Figura 19). Os valores médios encontrados para a densidade relativa aparente (DRA) do carvão oriundos de *Eucalyptus spp.* variaram entre 0,266 e 0,345g/cm³ para o trabalho de Santos et al. (2011). Frederico (2009) encontrou, para a mesma propriedade no carvão oriundo da madeira de clones de eucalipto, valores médios entre 0,285 a 0,323g/cm³. Normalmente, a densidade aparente do carvão é diretamente correlacionada com a densidade básica da madeira e deve apresentar o mesmo padrão de variação, tanto longitudinal como radialmente.

Densidade de energia é o produto da densidade relativa aparente (DRA) do carvão pelo poder calorífico superior (PCS). A densidade aparente possuiu um comportamento significativo estatisticamente de queda ao longo da posição longitudinal, contrário ao observado para a densidade de energia que apresentou tendência de aumento de acordo com a posição longitudinal. Esse fato indica que o poder calorífico superior exerce maior influência sobre a densidade de energia.

5.3 Correlação entre as características morfológicas das fibras e as do carvão vegetal

Na Tabela 19, apresentam-se as correlações entre as características anatômicas e as propriedades do carvão vegetal de todos os clones. Somente a densidade relativa aparente e a densidade de energia apresentaram correlações significativas com as características das fibras.

Verificou-se que a densidade relativa aparente foi influenciada significativa e negativamente pela largura da fibra, pelo diâmetro do lume, pelo coeficiente de flexibilidade, porém tem relação positiva com a fração parede e o índice de Runkel. A densidade de energia foi influenciada significativa e negativamente pela fração parede da fibra e pelo índice de Runkel, porém positivamente influenciada pelo diâmetro do lume.

Tabela 19 Correlação significativa entre as características anatômicas com as densidades aparente e energética do carvão

Variável	Variável	Correlação
LARG		-0,7070
LUME		-0,8583
CFL	DRA	-0,8601
FPA		0,8601
IRU		0,7471
FPA		-0,8187
LUME	DE	0,8259
IRU		-0,7144

LARG: largura da fibra; LUME: diâmetro de lume; CFL: coeficiente de flexibilidade; FPA: Fração parede, IRU: índice de Runkel; DRA: densidade relativa aparente; e DE: densidade de energia.

No trabalho realizado por Santos et al. (2011), o autor encontrou relação alta e negativa entre a largura da fibra e a densidade relativa aparente do carvão,

enquanto que o comprimento da fibra apresentou relação positiva. No presente trabalho, o comprimento da fibra não apresentou relação significativa com a densidade relativa aparente do carvão vegetal.

Na Tabela 20, encontram-se as correlações entre as características anatômicas com as do carvão vegetal obtido do material cerne. Observa-se que somente a densidade relativa aparente do carvão do cerne e a densidade de energia do cerne tiveram correlação significativa com as características anatômicas. A densidade relativa aparente do cerne apresentou correlação significativa e negativa com a largura da fibra, diâmetro do lume e coeficiente de flexibilidade e correlação significativa e positiva com o índice de esbelteza e a fração parede da fibra. Para a densidade de energia, obteve-se correlação estatisticamente significativa e positiva com a largura da fibra, diâmetro do lume e coeficiente de flexibilidade, entretanto apresentou relação significativa e negativa com a fração parede.

Tabela 20 Correlação entre as características anatômicas com as densidades relativa aparente e energética do carvão do material cerne

Variável	Variável	Correlação
DRAc	LARG	-0,7333
	LUME	-0,8129
	IES	0,7466
	CFL	-0,7862
	FPA	0,7862
DEc	LARG	0,7082
	LUME	0,7914
	CFL	0,7591
	FPA	-0,7591

LARG: largura da fibra; LUME: diâmetro de lume; CFL: coeficiente de flexibilidade; FPA: Fração parede, IES: índice de esbelteza; DRAc: densidade relativa aparente do cerne; e DEc: densidade de energia do cerne

Na Tabela 21, apresentam-se os valores de correlação entre as características anatômicas com as do carvão vegetal obtido do material alburno. Observou-se que somente a densidade aparente relativa do carvão do alburno e a densidade de energia do alburno tiveram correlação significativa em magnitude com as características anatômicas. A densidade relativa aparente apresentou correlação significativa e negativa com a largura da fibra, diâmetro de lume e coeficiente de flexibilidade e correlação significativa e positiva com o índice de esbelteza e a fração parede. Para a densidade de energia, verificou-se correlação significativa e positiva com a largura da fibra, diâmetro do lume e coeficiente de flexibilidade, além da correlação significativa e negativa com a fração parede.

Tabela 21 Correlação entre as características anatômicas com as densidades relativa aparente e energética do carvão do material alburno

Variável	Variável	Correlação
DRAa	LARG	-0,7715
	LUME	-0,8460
	IES	0,7616
	CFL	-0,8207
	FPA	0,8207
DEa	LARG	0,7288
	LUME	0,8143
	CFL	0,7843
	FPA	-0,7843

LARG: largura da fibra; LUME: diâmetro de lume; CFL: coeficiente de flexibilidade; FPA: Fração parede, IES: índice de esbelteza; DRAa: densidade relativa aparente do alburno; e DEa: densidade de energia do alburno.

Observou-se que, independentemente da posição radial a ser carbonizada (material cerne ou alburno), as correlações das propriedades anatômicas da madeira com as densidades de energia e relativa aparente do

carvão seguiram a mesma tendência, não variando em função do material utilizado. As magnitudes das correlações também não alteraram significativamente.

Na Tabela 22, encontram-se as correlações entre as características de produção e qualidade do carvão vegetal obtidas entre os materiais cerne e alburno.

Tabela 22 Correlação entre as características do carvão vegetal de cerne e alburno

Variável	Variável	Correlação
RGCa	RGCc	0,6369
TMVa	TMVc	-0,0311
TCZa	TCZc	0,2181
TCFa	TCFc	0,0245
PCSa	PCSc	-0,0316
DRAa	DRAc	0,9416
DEa	DEc	0,9858

RGC: rendimento gravimétrico em carvão; TMV: teor de materiais voláteis; TCZ: teor de cinzas; TCF: teor de carbono fixo; PCS; poder calorífico superior; DRA: densidade relativa aparente; DE: densidade de energia; a: alburno; c: cerne.

Pela Tabela 24, pode-se verificar que a análise química imediata do carvão vegetal não apresentou correlação significativa entre os materiais cerne e alburno. Porém, o rendimento gravimétrico de carvão, densidade relativa aparente e a densidade de energia apresentaram fortes correlações significativas e positivas entre os materiais cerne e alburno, indicando a elevada associação entre essas características dentro dessas posições radiais de amostragem.

6 CONCLUSÃO

6.1 Caracterização do carvão vegetal produzido de cerne, alburno e posição longitudinal de amostragem

Não foi observada diferença estatística significativa para o rendimento gravimétrico em carvão entre os materiais genéticos dentro da posição longitudinal 0% (base da árvore), enquanto que para 25 e 50% existe diferença significativa entre os materiais genéticos;

Os três materiais genéticos avaliados apresentaram tendência linear de redução do rendimento gravimétrico em carvão vegetal com o aumento da posição longitudinal de amostragem;

O carvão produzido pelo cerne apresentou maior rendimento gravimétrico, sendo estatisticamente diferente ao do alburno;

As características químicas do carvão não apresentaram efeito significativo de material genético, posição radial (cerne e alburno), posição longitudinal (base–topo), além das interações;

O poder calorífico superior foi menor no clone MN 463, sendo diferente estatisticamente dos demais clones. O alburno apresentou poder calorífico superior maior que o do cerne;

A densidade relativa aparente foi maior no *C. citriodora*, sendo diferente, estatisticamente, dos demais materiais genéticos. O mesmo efeito foi observado para a densidade de energia;

O alburno apresentou maior densidade relativa aparente que o cerne, sendo diferentes estatisticamente;

A densidade relativa aparente e a densidade de energia apresentaram tendências lineares de redução e aumento com a posição longitudinal de amostragem, respectivamente;

6.2 Caracterização das fibras e do carvão vegetal nas diferentes posições longitudinais de amostragem

O *C. citriodora* apresentou o maior comprimento e a maior espessura da parede celular, sendo estatisticamente diferente dos clones híbridos do *E. urophylla*, além da menor largura e menor diâmetro do lume das fibras. O clone VM 04 apresentou o maior valor de largura e diâmetro do lume das fibras, enquanto que o clone MN 463 apresentou valores intermediários;

O comprimento, largura e espessura da parede da fibra apresentaram tendência linear de redução em função da posição longitudinal de amostragem, enquanto que o diâmetro do lume apresentou comportamento contrário, ou seja, quanto mais próximo da base da árvore maior será o comprimento, largura e espessura da parede celular e menor diâmetros do lume das fibras;

O *C. citriodora* apresentou o maior índice de esbelteza, índice de Runkel e a maior fração parede, sendo estatisticamente diferente dos clones híbridos do *E. urophylla*, além do menor coeficiente de flexibilidade. O clone VM 04 apresentou o maior valor do coeficiente de flexibilidade e a menor fração parede;

A fração parede, índice de esbelteza e de Runkel apresentaram tendência linear de redução em função da posição longitudinal de amostragem, enquanto que o coeficiente de flexibilidade apresentou comportamento contrário, ou seja, na base as fibras são mais rígidas e mais flexíveis no topo da árvore;

O *C. citriodora* e o clone VM 04 apresentaram os maiores valores de rendimento gravimétrico em carvão, sendo estatisticamente iguais, enquanto que o clone MN 463 apresentou o menor valor;

O rendimento gravimétrico em carvão apresentou tendência linear de redução em função da posição longitudinal de amostragem, enquanto que a

composição química do carvão não foi afetada significativamente pelo material genético e posição longitudinal de amostragem;

O clone MN 463 apresentou o menor valor médio de poder calorífico superior (PCS), sendo estatisticamente diferente dos demais materiais genéticos. O *C. citriodora* e o clone VM 04 não apresentaram diferença estatística significativa para o PCS. O PCS não apresentou variação significativa com a posição longitudinal de amostragem.

O *C. citriodora* apresentou o maior valor de densidade relativa aparente do carvão, diferindo estatisticamente dos demais materiais genéticos. Os clones VM 04 e MN 463 apresentaram os menores valores médios de densidade de energia, não diferiram estatisticamente, enquanto que o *C. citriodora* apresentou o maior valor médio e, estatisticamente, diferente dos dois clones;

A densidade relativa aparente do carvão apresentou tendência linear de redução em função da posição longitudinal de amostragem, enquanto que a densidade de energia apresentou comportamento contrário.

6.3 Correlação entre as características anatômicas e as do carvão vegetal

A densidade relativa aparente do carvão apresentou correlação significativa e negativamente com a largura da fibra, diâmetro do lume, coeficiente de flexibilidade, porém relação positiva e significativa com a fração parede do índice de Runkel;

A densidade de energia apresentou correlação significativa e negativamente com a fração parede da fibra e índice de Runkel, porém positiva e significativa com diâmetro do lume;

O rendimento gravimétrico, a composição química imediata e o poder calorífico superior do carvão não apresentaram correlação significativa com as características dimensionais das fibras.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. C. D. **Variação das características das fibras em função da densidade básica de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden.** 1987. 43 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1987.
- ANTAL, M. J. et al. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 39, n. 11, p. 4024-4031, Oct. 2000.
- ALE, A. T. et al. Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 89-95, jan./fev. 2001.
- ALMEIDA, M. R. **Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria: produção e utilização de carvão vegetal.** Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 175-180.
- ALMEIDA, J. M. de. **Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedades dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** 1983. 40 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1983.
- ARANTES, M. D. C. et al. Gaseificação de materiais lignocelulósicos para geração de energia elétrica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 525-533, out./dez. 2008.
- 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 Recursos Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112:** carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1983. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633:** carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1983. 13 p.
- BOTREL, M. C. G. et al. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science: an introduction**. 5. ed. Alphaville: Wiley-Blackwell, 2007. 576 p.

BRAND, M.A.; MUÑIZ, G.I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 619-628, dez. 2010.

BRAND, M. A. et al. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 7, p. 2581-2588, July 2011.

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

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização**. Piracicaba: Editora da ESALQ, 2006. 4 p. (Circular Técnica, 28).

CARLI, E. et al. Aspectos químico, botânico e etnobotânico da espécie *Calophyllum brasiliensis* Cambess. **Biodiversidade**, Rondonópolis, v. 11, n. 1, p. 43-56, 2012.

CARVALHO, R. M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. Setor Florestal é destaque na economia brasileira. **Revista da Madeira**, São Paulo, v. 16, n. 95, p. 14-24, abr. 2006.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 393 p.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. Urophylla***. 2006. 99p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. Viçosa: Editora da UFV, 1996. 35 p.

COUTO, A. M. **Influência das propriedades anatômicas, químicas e físicas da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade do carvão para uso siderúrgico**. 2014. 174p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt wood. **Forest Products Laboratory**, Malbourne, n. 66, p. 1-28. 1972.

FLORESHEIM, S. M. B. et al. Variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 179-191, dez. 2000.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Produção mundial de carvão vegetal**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#ancor>>. Acesso em: 14 abr. 2014.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51, Jan. 1945.

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

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 158 p. (Série de Publicações Técnicas, 001).

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, jan./abr. 2007.
GOLDSTEIN, I. S. **Wood technology**: chemical aspects. Washington: America Chemical Society, 1977. 372 p.

GOMES, E. O.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**: volume 1. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 27-42.

HANS, A.S., BURLEY, J. Wood quality of eight Eucalyptus species in Zambia. **Experientia**, Basel, v. 28, n. 11, p. 1378-1380, Nov. 1972.

HILLIS, W. E. Properties of eucalypt woods of importance to the pulp and paper industry. **Appita Journal**, Melbourne, v. 26, n. 2, p. 113-121, 1972.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico**: ano base 2013. Brasília: IBA, 2014.

JARA, E. R. P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. **Comunicação Técnica**, São Paulo, v.1797, p.1-6, 1989.

KLITZKE, R. J. **Avaliação do carvão da bracatinga** (*Mimosa scabrella* Bentham) **em função da idade, do teor de umidade da madeira e da temperatura final de carbonização**. 1998. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I.S. **Wood structure and composition**. New York: Marcel Dekker, 1991. 488 p.

LIN, J. C. M. Desenvolvimento de um elevado rendimento e baixo tempo de ciclo de biomassa: sistema de produção. **Tecnologia de Processamento de Combustível**, Amsterdam, v. 87, n. 6, p. 487-495, jul. 2006.

MENDES, M. G.; GOMEZ, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 91-112.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço energético nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 288 p.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 107 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 62-73.

OLIVEIRA, E. et al. Efeito da qualidade da madeira sobre o rendimento e qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 85-97, 1989.

OLIVEIRA, E. de et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 311-318, mar./abr. 2006.

OLIVEIRA, E. et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (willd.) poir. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Jerônimo Monteiro: Supremo, 2008. 302 p.

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.

PÁDUA, F. A. de. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 99 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. de. **Text book of wood technology**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; BAGGIO, A. J. **Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Grevillea robusta***. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 11 p. (Circular Técnica, 40).

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C.; OLIVEIRA, E. **Carbonização**. Viçosa: Editora da UFV, 2008. 94 p. 1 Apostila.

QUADROS, L. Q. **Sistema brasileiro de respostas técnicas**. São Paulo: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. 25 p.

QUILHÓ, T.; MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Within-tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). **IAWA Journal**, Leiden, v. 27, n. 3, p. 243-254, 2006.

REZENDE, R. N. et al. Secagem ao ar livre de toras de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 41-47, jul. 2010. Suplemento.

ROCHA, F. T.; FLORESHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 43-45, jun. 2004.

ROUSSET, P. et al. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, Oct. 2011.

SANTOS, S. F. O. M. **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais**: alguns aspectos referentes à sustentabilidade. 2007. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, R. C. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, jun. 2011.

SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reation. New York: John Wiley, 1971. 916 p.

SEYE, O.; PINHEIRO, P. C. C. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE USO DA BIOMASSA PLANTADA PARA PRODUÇÃO DE METAIS E GERAÇÃO DE ELETRICIDADE, 1., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2001. 1 CD-ROM.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELLO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo, ABTCP, 1991. p. 178-183.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL ex. MAIDEN, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2001. 160 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SOUZA, L. M. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar.** 2002. 173 p. Tese (Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio grande do Norte, Natal, 2002.

SYRED, C. et al. A clean efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, London, v. 85, n. 10-11, p. 1566-1578, July/Aug. 2006.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt Wood. **Maderas, Ciência y Tecnología**, Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-14975, 2008.

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, v. 21, n. 2, p. 259-267, 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril*). **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

TRUGILHO, P. F. et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, jan./jun. 2005.

VALE, A. T. et al. Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 89-95, jan./fev. 2001.

VALENTE, A. F.; LELLES, J. G. Carbonização da madeira de *eucalyptus*. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 141, p. 74-79, set. 1986.

VALENTE, B. M. R. T. et al. Variabilidade radial e longitudinal das propriedades físicas e anatômicas da madeira de angico-vermelho. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 485-496, dez. 2013.

VALENTE, O. F.; VITAL, B. R. **A densidade da madeira e a produtividade em carvão vegetal.** Viçosa: SIF, 1985. 6 p. (Informativo SIF, 1).

WENZL, H. F. J. **A tecnologia química da madeira.** New York: Academic Press, 1970. 692 p.

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