



BRENO ASSIS LOUREIRO

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO
CARVÃO DE HÍBRIDOS ENTRE *Corymbia
citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson e
Corymbia torelliana (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S.
Johnson**

LAVRAS – MG

2016

BRENO ASSIS LOUREIRO

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO CARVÃO DE
HÍBRIDOS ENTRE *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S.
Johnson e *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Orientador

LAVRAS – MG

2016

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

Loureiro, Breno Assis.

Análise energética da madeira e do carvão de híbridos entre
Corymbia citriodora (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson e
Corymbia torelliana (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson / Breno
Assis Loureiro. – Lavras : UFLA, 2016.

87 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Qualidade da madeira. 2. Carvão vegetal. 3. *Corymbia*. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

BRENO ASSIS LOUREIRO

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO CARVÃO DE
HÍBRIDOS ENTRE *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S.
Johnson e *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 20 de abril de 2016.

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Silva Rosado UFLA

Profª. Dra. Vássia Carvalho Soares IFMG

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

LAVRAS – MG

2016

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças na realização de mais uma etapa em minha vida profissional.

Aos meus pais, Tovar e Miquelina, pelo apoio e amor incondicional. Aos meus avós e tia Angela pelas orações sempre desejando a minha felicidade.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira pela disponibilização dos laboratórios, equipamentos e tempo de aprendizado.

Ao professor Paulo Trugilho pelos ensinamentos passados, pela confiança depositada em meu trabalho e pela orientação que me ajudaram a chegar a esta conquista.

À Isabel pela paciência, amizade e ajuda imprescindível na realização do trabalho.

Aos colegas e amigos de laboratório pela excelente convivência e pelo companheirismo durante todo este tempo.

Às empresas Aperam Bioenergia e ArcelorMittal BioFlorestas pela disponibilização do material para a pesquisa.

Ao CAPES pelo apoio financeiro.

Aos professores do Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira pelo conhecimento transmitido.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, meu muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade da madeira e do carvão dos híbridos de *C. citriodora* com *C. torelliana*, em dois locais diferentes, para a produção do carvão vegetal. Foram utilizados sete clones, aos 3,75 anos, localizados no município de Itamarandiba-MG e seis clones, aos 6,42 anos, localizados no município de Dionísio-MG. Para as análises da qualidade da madeira e do carvão, foram retiradas amostras, ao longo do fuste das árvores até a altura comercial. O estudo das propriedades da madeira foi realizado com base na análise química, densidade básica, poder calorífico superior e análises termogravimétricas. A madeira foi carbonizada em escala de laboratório, com taxa de aquecimento média de $1,67^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, iniciando na temperatura de 100°C até temperatura máxima de 450°C , permanecendo por 30 minutos. Foram determinados os rendimentos gravimétricos da carbonização, todos na base seca. A qualidade do carvão foi avaliada, considerando-se a análise química imediata, densidade relativa aparente e poder calorífico superior. O experimento foi instalado, segundo o delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando estabelecidas diferenças entre eles, aplicou-se o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Para o estudo das correlações, foi usado o coeficiente de correlação de Pearson, testado pelo teste “t” a 5% de probabilidade. Os resultados mostram que existe variabilidade da madeira entre os materiais genéticos avaliados tanto em relação ao local quanto ao cruzamento. As análises térmicas da madeira apresentaram variações expressivas entre os clones e foi possível diferenciar duas etapas de degradação (hemiceluloses e celulose). Embora a maioria dos clones tenha apresentado propriedades satisfatórias, para produção de carvão vegetal, o clone 3, plantado em Itamarandiba, obteve melhor desempenho em razão do maior rendimento e eficiência energética, possuindo melhor potencial para a produção de carvão. Entretanto, o clone 9, plantado em Dionísio, foi o menos indicado, por apresentar a menor eficiência energética, menores rendimentos gravimétricos e densidades.

Palavras-chave: Qualidade da madeira. Carvão vegetal. *Corymbia*.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the wood and charcoal quality of hybrids clone of the crossing *C. citriodora* with *C. torelliana* in two different locations for charcoal production. Seven with 3,75 years old clones, planted at country of Itamarandiba – MG, and six 6,42 years old clones, planted in Dionísio – MG, were studied. For wood and charcoal quality analysis, samples were collected along the stem of the trees until the commercial height. Properties study of the wood was done by chemical analysis, basic density, superior heat power, and thermogravimetric analysis. The wood samples were carbonized in laboratory conditions with heating rate of $1.67^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, starting at 100°C until 450°C and keeping on this temperature for 30 minutes. It were determined the carbonizations gravimetric yield, all in dry basis. The wood quality was evaluated based on the chemical immediate analysis, relative apparent density, and gross heating value. The experiment was installed according to the completely randomized design, with five repetitions. The collected data were submitted to analysis of variance and, when the evaluated effects were significant by “F” test, was applied the Scott-Knott test at 5% probability for multiple comparisons. For correlation analysis, Pearson correlation coefficient, tested by the "t" test at 5% probability was used. Results showed variability of wood between the genetic materials evaluated in relation to place and plant crossing. The thermal analysis of the wood showed significant variation between clones and it was possible to differentiate two stages of degradation (hemicelluloses and cellulose). The majority of the clones presented satisfactory properties for the charcoal production, while, clone 3, planted in Itamarandiba, obtained the best performance due it have the higher yield and energetic efficiency, thus, achieving the best potential for charcoal production. However, clone 9, planted in Dionísio, was the less indicated for charcoal production since it presented the lowest energetic efficiency, gravimetric yield, and densities.

Keywords: Wood quality. Charcoal. *Corymbia*.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Madeira como fonte energética	15
3.2	Material genético	16
3.3	Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal	18
3.3.1	Densidade básica	19
3.3.2	Composição química da madeira	20
3.3.2.1	Composição elementar	20
3.3.2.2	Composição química estrutural	20
3.3.3	Poder calorífico	23
3.3.4	Análise termogravimétrica	24
3.4	Carbonização da madeira	25
3.5	Qualidade do carvão vegetal	26
4	MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1	Material de estudo e amostragem	29
4.2	Propriedades da madeira	31
4.2.1	Densidade básica	31
4.2.2	Poder calorífico superior (PCS) da madeira	31
4.2.3	Composição química elementar e estrutural	31
4.2.4	Análise termogravimétrica	33
4.3	Propriedades do carvão vegetal	33
4.3.1	Carbonização e rendimentos gravimétricos	33
4.3.2	Densidade relativa aparente	34
4.3.3	Poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal	34
4.3.4	Análise química imediata do carvão vegetal	34
4.4	Eficiência energética	34
4.5	Análise estatística	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Propriedades da madeira	37
5.1.1	Densidade básica	37
5.1.2	Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira	40
5.1.3	Composição química da madeira	43
5.1.3.1	Composição elementar	43
5.1.3.2	Composição química estrutural (lignina, extrativos, holocelulose e minerais)	46
5.1.4	Análise termogravimétrica (TG/DTG)	53
5.2	Propriedades do carvão vegetal	57
5.2.1	Rendimentos da carbonização	57

5.2.2	Densidade relativa aparente do carvão vegetal.....	60
5.2.3	Poder Calorífico Superior (PCS) do carvão vegetal	64
5.2.4	Análise química imediata do carvão vegetal	66
5.3	Eficiência energética	72
5.4	Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal	74
6	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A madeira como combustível possui diversas finalidades, tanto na forma direta como lenha ou do seu derivado como carvão vegetal. O carvão vegetal, dentro do setor industrial, destaca-se como um considerável produto, uma vez que o Brasil é líder mundial na produção siderúrgica que utiliza este biorredutor oriundo de plantações florestais. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2015), no Brasil, existem cerca de 125 indústrias que utilizam carvão vegetal no processo de produção de ferro-gusa, ferro-ligas e aço. O Estado de Minas Gerais concentra 80% dessas indústrias.

As florestas plantadas com finalidade industrial chegaram aos 7,74 milhões de hectares em 2014, o que representa 91% da madeira para este uso, com isso, houve um aumento de 1,8% em relação a 2013, e os demais 9% são provenientes de florestas nativas legalmente manejadas. Do total de 7,74 milhões de hectares de árvores plantadas, 15,2% pertencem à siderurgia a carvão vegetal (IBÁ, 2015). A ampliação da utilização do carvão vegetal, proveniente de florestas plantadas, possui vantagens ambientais, visto que a sua utilização é alternativa aos combustíveis fósseis, atuando, assim, na redução das emissões dos gases de efeito estufa na siderurgia brasileira, além de diminuir a pressão sobre as florestas nativas, ajudando, assim, em sua conservação, porém apesar dessas importantes vantagens do carvão vegetal, a heterogeneidade química, física e mecânica afetam, consideravelmente, sua performance nos altos fornos siderúrgicos.

No Brasil, as espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas, para esta finalidade, fato que se deve não só pelo seu rápido crescimento, mas também por apresentar grande diversidade de espécies e clones, além da sua adaptabilidade a diferentes condições de clima e solo. Desse modo, é possível abranger os diversos segmentos da produção industrial madeireira.

O gênero *Eucalyptus* possui um grande número de espécies, podendo ser separados em grupos, de acordo com suas características predominantes, destacando as ligadas à reprodução. A partir de 1971, foram elaboradas chaves sistemáticas para os *Eucalyptus*, dividindo-se em diversos subgêneros, destacando: *Symphyomyrtus*, *Corymbia* e *Monocalyptus*. Foi feita uma revisão dessas chaves, reformulando a classificação antiga, assim, em 1995, as espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* foram separadas. O trabalho de Hill e Johnson (1995) apresentava 113 espécies de *Corymbia*, sendo as mais conhecidas: *Corymbia citriodora*, *Corymbia maculata* e *Corymbia torelliana*.

As espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* apresentam variações, na qualidade de suas madeiras, em função de diferenças em sua estrutura anatômica, composição química e das propriedades físicas e mecânicas. Por esses motivos, as empresas buscam novas tecnologias de produção e avaliação da madeira como matéria-prima para o fornecimento de energia ou conversão em carvão vegetal.

Algumas características da madeira possuem maior relevância como, por exemplo, o incremento volumétrico da árvore, que afeta a produção de massa seca do indivíduo. Além disso, a composição química, destacando o alto teor de lignina, associada à elevada densidade básica da madeira, afetam, positivamente, o rendimento em carvão vegetal (TRUGILHO et al., 1997).

Os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e cinzas podem contribuir, efetivamente, na avaliação de combustíveis de biomassa, pois estão conectados ao índice de desempenho energético (PROTÁSIO et al., 2011).

Para Botrel et al. (2007), há poucos trabalhos disponíveis, em relação à seleção de material genético superior, para a produção de carvão vegetal. Os autores, ainda, declaram que o desempenho do produto é muito importante, porque o aperfeiçoamento da matéria-prima, concomitantemente, com o produto final alcançará melhores resultados.

Dessa forma, estes novos materiais estão sendo utilizados, em programas de melhoramento genético, visando à seleção de genótipos superiores para a finalidade energética. A geração de híbridos naturais ou via polinização controlada já é uma realidade dentro das empresas florestais e muitos clones se encontram em escala de teste. Dentro desse contexto, o cruzamento do *Corymbia citriodora* com o *Corymbia torelliana* vem sendo realizado na busca por material genético com madeira de elevada densidade. Com isso, será realizada a avaliação da qualidade dessa madeira visando ao seu aproveitamento energético.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi avaliar a qualidade da madeira de clones de híbridos de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* e *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* visando à produção de carvão vegetal.

Como objetivos específicos citam-se:

- a) Caracterizar a madeira e o carvão vegetal em relação às suas propriedades físicas, químicas e energéticas;
- b) Analisar a decomposição térmica da madeira por meio da termogravimetria;
- c) Determinar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e não condensáveis;
- d) Avaliar a correlação entre as características da madeira com as do carvão;
- e) Avaliar e identificar os clones estudados com maior potencial energético na produção vegetal.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A utilização do carvão vegetal com destino ao setor industrial em grande escala é exclusiva do Brasil. Este produto é usado como redutor e combustível na produção de ferro-gusa, ligas metálicas e aço.

O carvão vegetal como termorreductor tem várias vantagens tanto ambientais como econômicas, diminui o consumo de combustíveis fósseis, reduz as emissões de CO₂ e outros gases poluentes, como também apresenta menor dependência com o mercado externo, o que não ocorre com o uso do carvão mineral. Entretanto, possui, também, algumas desvantagens como, por exemplo, a menor resistência mecânica e densidade, que é o entrave na sua utilização em grandes plantas industriais.

Mesmo com as vantagens apresentadas por esse insumo energético, ainda, há gargalos quanto à sua produção, sua tecnologia utilizada e, também, à matéria-prima de origem.

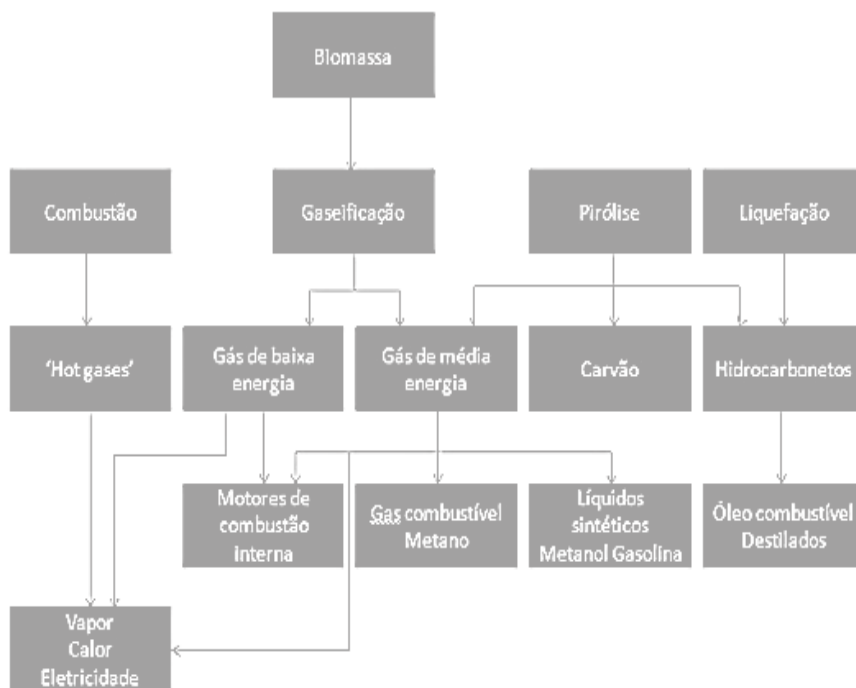
Na produção do carvão vegetal, deve-se destacar a qualidade da madeira, pois suas características como a densidade básica, constituição química e composição elementar, poder calorífico dentre outras são critérios, para seleção de uma madeira com potencial para esta finalidade, sendo desejável aquela que esteja associada ao alto rendimento, elevada qualidade e baixo custo.

3.1 Madeira como fonte energética

Há duas formas para se obter energia que advém da madeira. A forma primária está relacionada à queima direta desta madeira, podendo ser usada em instalações industriais, gerando calor ou vapor, enquanto a forma secundária obtém combustíveis, em diferentes maneiras (sólida, líquida ou gasosa), por meio da pirólise, hidrólise, gaseificação e transesterificação (MCKENDRY, 2002a). Pode-se observar que existem várias formas, para aproveitar a energia

estocada na biomassa, dependendo do objetivo do empreendimento. A Figura 1 mostra as rotas convencionais de conversão termoquímica da biomassa.

Figura 1 - Conversão termoquímica da biomassa.



Fonte: Adaptado de Mckendry (2002a) por Quinhones (2011).

3.2 Material genético

A faixa natural de ocorrência do *Corymbia citriodora* é, no leste da Austrália, principalmente, no estado de Queensland (QLD). A sua adaptação fisiológica a diferentes regiões brasileiras, incremento volumétrico e a forma do fuste são as principais razões para o cultivo de *Corymbia citriodora*. No Brasil, o plantio de *Corymbia citriodora* tem como finalidade a produção de madeira para serraria, energia e exploração de folhas para extração de óleo essencial (BOLAND et al., 2006; FONSECA et al., 2010).

No melhoramento de espécies arbóreas, para a produção de energia e biomassa, além do volume de madeira e densidade básica, outras características apresentam excepcional importância. Deste modo, teor de lignina, poder calorífico e teores de carbono fixo e voláteis devem, também, ser priorizados (FONSECA et al., 2010).

O *Corymbia citriodora* possui uma madeira com alta densidade, cerca de $0,7 \text{ g/cm}^3$, alta contração volumétrica, ótimo fator anisotrópico e menor incremento volumétrico anual de madeira comparado com às espécies mais plantadas no Brasil; além disso, o percentual de casca é elevado, podendo chegar a 30% do volume do tronco (REIS et al., 2014).

O *Corymbia torelliana* consiste em espécie nativa, localizada ao norte de Queensland (QLD), Austrália (BOLAND et al., 2006, FONSECA et al., 2010).

A espécie *Corymbia torelliana* possui a maior capacidade de enraizamento (em média 30%), em relação a outras espécies pertencentes ao gênero *Corymbia*, com isso, esta espécie é importante na formação de híbridos interespecíficos dentro do gênero *Corymbia*, já que vários clones são enraizáveis pelo efeito positivo da participação do *Corymbia torelliana*. O efeito materno no enraizamento faz com que, ao utilizar *Corymbia torelliana* como genitor feminino, há maior quantidade de clones com níveis de enraizamento comerciais do que os cruzamentos recíprocos (ASSIS, 2000).

Há pouca disponibilidade de informações sobre a espécie *Corymbia torelliana* no Brasil. Durante anos, o uso de *Corymbia torelliana* foi desprezado, em plantios comerciais, por causa do seu baixo desempenho de crescimento. Entretanto, atualmente, essa espécie ganhou importância, na composição de híbridos interespecíficos, destacando-se pelo desempenho em volume de madeira, propriedades tecnológicas da madeira para vários usos, tolerância a

várias doenças e insetos-praga, vento frio e seca, além de maior facilidade para propagação vegetativa (REIS et al., 2014).

No momento, o cruzamento entre *Corymbia torelliana* e *Corymbia citriodora* tem ocupado o centro das atenções de vários pesquisadores de instituições públicas e privadas no Brasil. Isso porque alguns híbridos resultantes desse cruzamento têm apresentado vantagens significativas em termos de crescimento, facilidade na propagação vegetativa, além de tolerância a doenças, insetos e ao frio. Na Austrália, esses híbridos têm exibido alta plasticidade fenotípica, com plantios conduzidos em diferentes condições edafoclimáticas, muitas vezes, não adequadas às espécies genitoras (LEE, 2007). Ainda são incipientes os estudos dessas espécies, associados às correlações entre a qualidade da madeira e a qualidade do produto desejado, inclusive, para finalidade energética.

3.3 Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal

É importante o conhecimento das propriedades da madeira, pois podem variar, de acordo com o genótipo, o ambiente e a interação entre estes dois fatores. A idade, também, é um fator que interfere nas diferentes propriedades da madeira.

A madeira sendo um material que apresenta alta variabilidade em suas propriedades pode ter consequências positivas ou negativas em relação ao uso final. Apesar de não ser restritiva a sua utilização, algumas características internas da madeira irão influenciar a produção de energia, destacando-se o teor de lignina e a densidade básica.

É necessário melhorar as propriedades da madeira, no que diz respeito ao poder calorífico superior (PCS), teor de lignina, qualidade da lignina expressa pela relação siringil/guaiacil, teor de extrativos e minerais, qualidade das fibras, incremento médio anual, massa seca e a densidade básica. Com isso, é

importante fundamentar parâmetros, de acordo com a qualidade da madeira; para o seu uso final é desejável e necessário, pois podem ajudar na definição de valores econômicos e tecnológicos.

3.3.1 Densidade básica

A densidade básica é a relação entre a massa absolutamente seca da madeira pelo volume verde ou saturado, sendo expressa em g.cm^{-3} ou kg.m^{-3} .

Brito e Barrichelo (1980) mostraram que a densidade básica da madeira e a densidade do carvão possuem uma forte correlação (0,97). Assim, quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido e, conseqüentemente, maior será a produção em massa em carvão vegetal, para um determinado volume de madeira enfiada. Este fato evidencia a importância da densidade básica da madeira, tornando-a um considerável parâmetro na escolha de matérias – primas, destinadas à produção de carvão vegetal, bem como para pesquisas em melhoramento genético florestal. Para Trugilho et al. (2001), a densidade básica é a propriedade física de maior atuação, na qualidade do carvão, pois está associada com diversas outras propriedades da madeira e interfere, de forma significativa, na qualidade de seus derivados.

Em árvores mais adultas e maduras, de maneira geral, uma elevada densidade apresentará uma composição química mais estável. Pereira, Schaitza e Baggio (2000) observaram que essa relação de maior densidade e maior teor de lignina apontará para um carvão com melhor qualidade, exibindo alto rendimento gravimétrico, aumento no teor de carbono fixo e na densidade aparente do carvão. De forma geral, recomenda-se densidade básica da madeira superior a 500 kg.m^{-3} para a produção do carvão vegetal.

3.3.2 Composição química da madeira

A madeira é um material orgânico que apresenta composição química complexa, sendo constituída de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e de uma pequena fração de inorgânicos.

3.3.2.1 Composição elementar

A composição química pode ser um considerável parâmetro no uso da madeira como fonte de energia. De modo geral, a madeira possui, aproximadamente, 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 43% de oxigênio e 0,5% de nitrogênio, enquanto a presença de enxofre é insignificante, quando comparado aos combustíveis fósseis (DOAT, 1977).

As frações em massa dos componentes químicos da madeira variam de uma madeira para outra, com isso, mesmo que a composição química elementar não varie de uma forma considerável, podem ocorrer alterações nas propriedades dos produtos chamados de fontes secundárias de energia, destacando o carvão (RAAD, 2004).

A presença de altos teores de carbono e hidrogênio, além de baixos teores de oxigênio na madeira, é o que se deseja na produção de energia, pois esses componentes elementares irão influenciar no poder calorífico. Desse modo, maiores concentrações de oxigênio na biomassa refletem em menor poder calorífico, enquanto altos teores de carbono e hidrogênio favorecem o aumento no poder calorífico (HUANG et al., 2009).

3.3.2.2 Composição química estrutural

O entendimento da composição química da madeira é importante para a escolha do seu uso. Os seus constituintes químicos são holocelulose, lignina, extrativos e minerais.

O maior teor dos componentes fundamentais, destacando a lignina, faz com que se obtenha um carvão de maior densidade e mais resistente, já às

propriedades físico-mecânicas não se desejam elevados teores de holocelulose, quando o produto final for o carvão vegetal, pois apresentam maior instabilidade à degradação térmica (SANTOS, 2010).

A celulose é avaliada como o constituinte químico da madeira mais significativo, constituindo 40 a 45% da matéria seca das madeiras, encontra-se de maneira principal, na parede secundária, é um polissacarídeo linear composto por unidades de β -d-anidroglicopirranose, unidas por ligações glicosídicas do tipo $\beta(1-4)$. Por possuir uma estrutura cristalina, por meio das ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, dando alta estabilidade à molécula de celulose, ela possui maior dificuldade de degradação, o que a diferencia das hemiceluloses que são fáceis de serem degradadas, dessa forma, sua decomposição é realizada na faixa de temperatura de 260 a 350°C (ROWELL et al., 2005).

Em fornos de alvenaria, o processo de carbonização ocorre, em temperaturas acima de 300°C, assim, a contribuição da celulose, nesse processo, é pouco expressiva. Utilizando temperatura de 400°C, a celulose contribui com 13% no rendimento do carvão (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1984).

As hemiceluloses da mesma forma que a celulose pouco colaboram para o rendimento do carvão. Na temperatura de 450°C, as hemiceluloses representam cerca de 10% do rendimento do carvão vegetal (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006).

A lignina (18-25% em folhosas e 25-35% em coníferas) é um composto hidrofóbico, amorfo, ramificado e tridimensional, formado por unidades básicas de fenilpropano, com ligação éter (C-O-C) e carbono-carbono (C-C), não possuindo unidades repetidoras definidas. A lignina apresenta função adesiva entre os tecidos, conferindo dureza e rigidez à parede celular (ROWELL et al., 2005).

A lignina apresenta elevado índice de aromaticidade, somado com o seu tamanho e arranjo da estrutura, exibe alta resistência à degradação térmica em

razão da complexidade da sua estrutura química e sua decomposição ocorre de forma lenta (YANG et al., 2007).

Segundo Brito e Barrichelo (1977), o carvão foi o produto com maior abundância na carbonização da lignina, em temperatura a 550°C, mostrando uma boa relação com o rendimento em carvão. Como consequência, esses autores afirmam que madeiras com elevado teor de lignina produzem carvão com maiores teores de carbono fixo, isso ocorre em decorrência da lignina apresentar valores próximos a 65% de carbono elementar (C), valores superiores aos das hemiceluloses e da celulose; além do mais, a composição química é influenciada pela temperatura final da carbonização e taxa de aquecimento, indicando, assim, a lignina como o componente químico da madeira mais importante quando a produção desejada é o carvão vegetal.

Os extrativos são o grupo que contêm diversos compostos químicos presentes na madeira, mas que não constituem a estrutura essencial dessa madeira, por exemplo, os polifenóis, óleos, gorduras, resinas, amido e ceras.

Em sua maioria, independente de folhosa ou conífera, a localização dos extrativos é no cerne, eles são os principais responsáveis na formação da cor, do cheiro, do sabor e durabilidade da madeira. Em geral, as madeiras não apresentam altos teores de extrativos e as madeiras de clima mais quente possuem maior teor de extrativos do que as madeiras de clima frio. A origem fenólica de alguns extrativos pode atuar no aumento do poder calorífico da madeira e do carvão, em virtude da presença do alto teor de carbono (ROWELL et al., 2005).

Os minerais ou cinzas são constituintes inorgânicos que não participam do processo de combustão da biomassa, representando 1% da massa seca da madeira. Alta porcentagem de cinzas é prejudicial ao carvão, ou seja, os minerais são indesejáveis, para a produção de carvão vegetal, destinado a fins energéticos, pois, após a carbonização, é formado resíduo, dado que essa

propriedade não é degradada no processo; por consequência, contribui para a redução do PCS do carvão vegetal e pode tornar o carvão quebradiço, menos maleável e com campos favoráveis à propagação de trincas e fissuras (ANDRADE, 1993).

3.3.3 Poder calorífico

Na seleção de clones, para a produção de energia, o poder calorífico é um excelente parâmetro, para avaliar o potencial energético de combustíveis de biomassa, podendo ser definido como a medida da quantidade de energia que um combustível possui, ou seja, o quanto de calor que é liberado na sua combustão completa (kcal), quando este é queimado por unidade de massa da madeira (kg). A presença de hidrogênio elementar na madeira faz com que, após a combustão, ocorra formação de água, na forma gasosa, quando condensada libera-se o calor de condensação.

Divide-se o poder calorífico em inferior e superior. O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia que está, realmente, acessível por unidade de massa de combustível após descontar as perdas pela evaporação da água (QUIRINO et al., 2005). O Poder Calorífico Superior (PCS) é quando a combustão ocorre em volume constante e a água, que é formada nessa combustão, é condensada e o calor consequente desse processo é recuperado (QUIRINO et al., 2005).

No trabalho de Doat e Petroff (1975), com espécies tropicais, foi observado que a madeira que possui maior teor de lignina e extrativos tem alto poder calorífico. O aumento do teor de carbono fixo e a redução no teor de materiais voláteis faz com que ocorra um acréscimo no poder calorífico superior do carvão. A umidade presente no combustível afeta, negativamente, o poder calorífico da madeira. Cotta (1996) mostra a importância da umidade, em que a participação da água na madeira afeta a energia gasta no processo, para que esta seja evaporada, com isso, diminui o poder calorífico. Além do mais, a

variabilidade da umidade pode tornar o controle do processo de combustão mais difícil.

3.3.4 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica da madeira determina a perda de massa, em um determinado programa de temperatura, obtendo informações da composição e da estabilidade térmica, além de conhecer as faixas de temperaturas em que a decomposição é maior.

Essa técnica é proveniente de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação), de acordo com a temperatura ou com o tempo e tem sido utilizada na determinação dos parâmetros cinéticos da pirólise (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002). A cinética da degradação da biomassa é importante para entender os fenômenos da degradação térmica.

Divide-se, em duas formas, o uso das análises termogravimétricas:

- a) Termogravimetria isotérmica: é feito o registro da massa em função do tempo com a temperatura constante;
- b) Termogravimetria dinâmica: ocorre um aumento de temperatura definindo uma taxa de aquecimento constante.

As curvas das análises termogravimétricas podem ser influenciadas por fatores instrumentais, destacando a razão de aquecimento do forno e a atmosfera do forno, além de fatores inerentes às características da amostra, como, por exemplo, o tamanho de partículas, quantidade de amostra e a condutividade térmica da amostra (MATOS; MERCURI; BARROS, 2009).

3.4 Carbonização da madeira

A carbonização ou pirólise é quando acontece a decomposição da madeira de forma controlada, havendo interação com a temperatura (acima de 300°C) e o oxigênio, promovendo mudanças dos seus componentes, sendo o produto principal o carvão vegetal na forma sólida (35%), mas há ocorrência de outros produtos como gases, ácido pirolenhoso e alcatrão insolúvel (aproximadamente, 65%) que, também, são compostos energéticos, porém pouco usados nas indústrias (MCKENDRY, 2002b). Com a finalidade de elevar o teor de carbono na massa decorrente desse processo, esse resultado final pode estar ligado à composição química da madeira, além de algumas características físicas e anatômicas.

Os constituintes químicos da madeira possuem resistência térmica variada em razão das suas estruturas, neste caso, a carbonização acontece em etapas: hemiceluloses são as que degradam primeiro (200-260°C), depois a celulose (240-350°C) e, por último, a lignina (280-500°C), mostrando, assim, que os compostos químicos da madeira influenciam o rendimento do carvão, ressaltando o teor de lignina em decorrência dos seus anéis aromáticos que colaboram para elevados rendimentos em carvão (SANTOS, 2010).

A carbonização apresenta reações endotérmicas até aproximadamente 280°C, após essa faixa de temperatura, em geral, o comportamento é exotérmico. No primeiro período com temperaturas entre 100-200°C acontece a secagem da madeira. Após essa faixa de temperatura, começa a liberação de ácido acético, metanol, H₂O e CO₂, ocorrendo entre 200°C a 280°C. Acima de 300°C, há uma maior degradação da madeira em consequência da produção de hidrocarbonetos e metanos. Entre 280-500°C, há liberação de gases (CO, CH₄ e alcatrões), em temperaturas acima de 500°C há liberação de pequenas quantidades de voláteis (H₂) (TRUGILHO et al., 2001).

A qualidade do carvão vegetal e o seu rendimento gravimétrico são afetados pela qualidade da madeira e pela tecnologia utilizada no processo de carbonização. As propriedades da madeira como a densidade, resistência à degradação térmica, composição química e anatômica são parâmetros que devem ser analisados, pois exercem influência sobre a produção e a qualidade do produto. No que se refere ao processo de carbonização à temperatura final, taxa de aquecimento, pressão e o tamanho do material a ser utilizado pode afetar a qualidade do carvão vegetal. Geralmente a maior temperatura de carbonização significa maior teor de carbono fixo e menor rendimento gravimétrico em carvão.

3.5 Qualidade do carvão vegetal

O carvão vegetal é um material sólido, poroso, de fácil combustão e produz significativas quantidades de calor. Esse carvão vegetal opera no alto-forno como fonte de energia para o processo, além de ser utilizado como fonte de carbono, para a redução do minério de ferro, para isso, ele deve possuir granulometria apropriada para a difusão dos gases e favorecer a reação. Em função dessas características, o conhecimento de suas propriedades auxiliará na distinção de madeiras mais apropriadas para a conversão energética e obter ganhos significativos em produtividade (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

Para a avaliação do carvão, é realizada a análise química imediata que irá determinar estas frações, além da umidade presente nele. A composição química possui boa correlação entre os teores de carbono fixo e carbono elementar no carvão produzido sob temperaturas acima de 400°C (PINHEIRO et al., 2006).

Além disso, o teor de lignina e a densidade da matéria prima interferem, diretamente, no rendimento e na densidade do produto final. A lignina,

extrativos e a densidade da madeira possuem relação direta com o carbono fixo, o que não ocorre com a holocelulose que apresenta relação inversa. Os materiais voláteis têm relação direta com as propriedades físicas de porosidade e friabilidade e contrária com a densidade (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

A umidade no carvão deve ser baixa e a mais constante possível no decorrer do processo. A perda de umidade causa modificações nas características físicas, tendo em vista que a eliminação da água pode ocasionar fissuras e quebras, conseqüentemente, reduzindo o tamanho médio das partículas e aumentando a de finos, além de requerer aumento na quantidade de calor para vaporizar a água; resultando em mais reações de combustão consumindo mais carvão (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

Outras propriedades, também, são estudadas no carvão em busca de melhor qualidade. Segundo Oliveira, Mendes e Gomes (1982), as propriedades do carvão indicadas como parâmetros de qualidade são densidade, porosidade, poder calorífico superior, resistência mecânica, reatividade, rendimento gravimétrico e rendimento em líquido pirolenhoso.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material de estudo e amostragem

Neste estudo, foram avaliadas 35 árvores, aos 3,75 anos, da empresa Aperam Bionergia, localizada na cidade de Itamarandiba, no estado de Minas Gerais, procedente do cruzamento do *Corymbia citriodora* com o *Corymbia torelliana*, sendo três híbridos do *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* e quatro do *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* (Tabela 1).

O município de Itamarandiba possui coordenadas geográficas 17,86°S de latitude e 42,86°W de longitude. A precipitação média varia de 1150 a 1450 mm, a temperatura média anual do município é de 20,1°C e o clima é tropical de altitude Cfa, (Koppen) com duas estações bem distintas. Os solos que predominam na região são luvisolos férricos, ferralsolos ácidos e arenossolos. A tipologia florestal que se destaca é o cerrado, desde os cerradões a campos, com pequenas ocorrências de matas semidecíduais e caducifólias (MULLER, 2005).

Também foram avaliadas 30 árvores, aos 6,42 anos, da empresa ArcelorMittal BioFlorestas, no município de Dionísio, no estado de Minas Gerais, plantadas em latossolo vermelho amarelo e procedente do cruzamento do *Corymbia citriodora* com o *Corymbia torelliana*, sendo três híbridos do *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* e três do *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* (Tabela 1).

No município de Dionísio, a precipitação média anual é de 1450 mm, sendo o clima úmido-subtropical, média anual de 20-23°C e estação chuvosa de dezembro a fevereiro (SILVA JÚNIOR; SCARANO; CARDEL, 1995).

Tabela 1 - Informações gerais sobre os materiais genéticos utilizados no estudo das empresas Aperam Bioenergia e ArcelorMittal BioFlorestas.

Clones	Cruzamento	Idade (anos)	Espaçamento (m)	Local
1	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
2	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
3	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
4	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
5	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
6	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
7	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75	3,0 x 3,0	Itamarandiba
8	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	6,42	3,0 x 2,5	Dionísio
9	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	6,42	3,0 x 2,5	Dionísio
10	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	6,42	3,0 x 2,5	Dionísio
11	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	6,42	3,0 x 2,5	Dionísio
12	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	6,42	3,0 x 2,5	Dionísio
13	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	6,42	3,0 x 2,5	Dionísio

Foram selecionadas cinco árvores de cada clone, evitando efeito de borda e escolhendo árvores sadias com o objetivo de representar da melhor forma os híbridos do estudo. Para o material de Itamarandiba, de cada árvore selecionada retiraram -se discos de, aproximadamente, de 2,5 cm de espessura, localizados a 0%, 2%, 10%, 30%, 50%, 70% e 100% da altura comercial de cada árvore. Entretanto, para o material de Dionísio, os discos retirados estavam localizados a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% em relação à altura comercial da árvore. Em ambos os casos, a altura comercial foi definida até a circunferência de 9,4 cm. Posteriormente, esses discos foram seccionados em cunhas passando pela medula, duas cunhas opostas destinadas à densidade básica e as outras duas cunhas opostas para as análises da madeira e à carbonização.

Nas cunhas opostas de cada disco destinadas para composição química elementar e estrutural da madeira, do poder calorífico superior e das análises térmicas, coletaram -se amostras com uma plaina elétrica manual, na forma de

serragem, em posições longitudinais de amostragem, formando uma amostra composta. O restante das cunhas foi destinado às carbonizações.

4.2 Propriedades da madeira

As propriedades físicas, químicas e energéticas das madeiras utilizadas foram avaliadas segundo diretrizes normativas citadas a seguir.

4.2.1 Densidade básica

Foram usadas duas cunhas opostas de cada disco, sendo utilizado o método de imersão retratado pela norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), posteriormente, calculou-se a densidade básica média aritmética de cada árvore.

4.2.2 Poder calorífico superior (PCS) da madeira

O poder calorífico superior da madeira (PCS) foi determinado em duplicata, utilizando o calorímetro digital IKA C-200, conforme a norma NBR 8633 (ABNT, 1984). Foi utilizada a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh. As amostras foram secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até massa constante, para a determinação do poder calorífico superior.

4.2.3 Composição química elementar e estrutural

Para as análises de composição química estrutural, utilizou-se a fração de madeira que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. A fração que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na peneira de 270 mesh foi usada na análise elementar e térmica.

Determinaram -se os componentes elementares (C, H, N, S e O) da madeira pelo material, previamente, seco em estufa. A amostra de 2 mg foi colocada em cápsulas de estanho e incineradas a 1200°C no analisador universal da marca Elementar. O equipamento determina os teores de carbono, hidrogênio,

nitrogênio e enxofre (CHNS). O teor de oxigênio foi obtido por diferença, conforme a equação 1.

$$O(\%) = 100 - C(\%) - H(\%) - N(\%) - S(\%) - Tcz(\%) \quad (1)$$

Em que O: teor de oxigênio; C: teor de carbono; H: teor de hidrogênio; N: teor de nitrogênio; S: teor de enxofre; Tcz: teor de cinzas.

O teor de extrativos totais foi obtido, conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 2001a), substituindo o etanol/benzeno por etanol/tolueno.

O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason modificado, conforme o procedimento recomendado por Gomide e Demuner (1986). O teor de lignina solúvel foi obtido de acordo com o procedimento proposto por Goldschimid (1971). O teor de lignina total representa a soma do teor de lignina solúvel mais a lignina insolúvel.

A porcentagem de cinzas na madeira foi determinada, de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana com temperatura de 750°C durante 6 horas.

O teor de holocelulose foi obtido por meio da análise somativa dos componentes químicos (Equação 2). O teor de cinzas foi obtido pela norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

$$HOLO = 100 - (Tlig + Tet + Tcz) \quad (2)$$

Em que HOLO: teor de holocelulose (%); Tlig: teor de lignina total (%); Tet: teor de extrativos totais (%); Tcz: teor de cinzas (%).

4.2.4 Análise termogravimétrica

Os ensaios, para a análise termogravimétrica da madeira, foram realizados pelo aparelho TGA-60, da marca Shimadzu. Selecionaram -se três árvores de cada clone, para a realização dessa análise; foram escolhidas as de menor e maior densidade, além da árvore que apresentou densidade intermediária. Executaram-se as análises sob atmosfera de gás de nitrogênio, a uma vazão constante de $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ com cerca de 4 mg de amostra de madeira classificadas nas peneiras de 200 a 270 mesh.

As curvas termogravimétricas partiram da temperatura ambiente até 600°C , com taxas de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

4.3 Propriedades do carvão vegetal

As propriedades do carvão vegetal foram avaliadas segundo diretrizes normativas citadas a seguir.

4.3.1 Carbonização e rendimentos gravimétricos

Foram retiradas amostras dos discos, ao longo da altura comercial, formando uma amostra composta por árvore. A madeira foi, previamente, seca em estufa calibrada a $105\pm 3^\circ\text{C}$ até a massa constante.

Realizaram-se as carbonizações em forno elétrico de laboratório adaptado para esta finalidade. As amostras foram introduzidas, em um recipiente metálico, com dimensões nominais de 30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro. O líquido pirolenhoso foi obtido, por meio de um condensador tubular resfriado a água, acoplado ao forno elétrico, para resfriamento da fração gasosa e sua condensação em recipiente, previamente, tarado.

O tempo total da carbonização foi de quatro horas, com taxa de aquecimento de $1,67^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. A carbonização iniciou na temperatura de 100°C até temperatura máxima de 450°C , mantendo estabilizada por 30 minutos.

Após as carbonizações, determinaram-se os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, todos em relação à massa seca de madeira.

4.3.2 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada pelo mesmo procedimento utilizado para a determinação da densidade básica da madeira.

4.3.3 Poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal

O poder calorífico superior (PCS) do carvão foi determinado, de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984). Utilizou-se o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retirado na de 60 mesh.

4.3.4 Análise química imediata do carvão vegetal

A composição química imediata foi determinada de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR 8112 (ABNT, 1986). Utilizou-se o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh.

4.4 Eficiência energética

A análise de variância, para a eficiência energética da carbonização, foi calculada pela equação 3.

$$EE = \frac{PCS \text{ carvão} \times RGC}{PCS \text{ madeira}} \times 100 \quad (3)$$

Em que PCS carvão: poder calorífico superior do carvão (%); RGC: rendimento gravimétrico do carvão (%); PCS madeira: poder calorífico superior da madeira.

4.5 Análise estatística

Na avaliação do experimento, foi considerado o Delineamento Inteiramente Casualizado, com sete tratamentos (clones), para os genótipos procedentes de Itamarandiba, e seis tratamentos (clones), para o material genético de Dionísio. Para as propriedades da madeira, os rendimentos da carbonização e as propriedades do carvão vegetal, utilizaram -se cinco repetições. Para análise termogravimétrica, foram realizadas três repetições, em que se optou por selecionar as árvores de menor, intermediária e maior densidade básica.

Para comparação múltipla de médias, foi utilizado o teste Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Para determinar as correlações existentes entre as propriedades da madeira com os rendimentos e as propriedades do carvão vegetal, foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson, considerando-se o nível 95% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos programas SISVAR 5.6 e SAEG 9.1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar o entendimento, os resultados serão discutidos de forma separada das características avaliadas na madeira e no carvão vegetal produzido.

5.1 Propriedades da madeira

Em seguida estão apresentados os resultados das propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira.

5.1.1 Densidade básica

No estudo de Trugilho et al. (2001), os autores destacaram a densidade básica da madeira como a propriedade que mais influenciou a qualidade do carvão vegetal.

A Tabela 2 mostra a variação dos valores médios e o teste de comparação múltipla, para a densidade básica da madeira dos diferentes materiais genéticos, procedentes de teste clonal, em Itamarandiba. A análise de variância mostrou que o efeito de clone foi significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 2 - Valores médios da densidade básica (DB) da madeira nos diferentes clones plantados em Itamarandiba

Clones	Cruzamento	DB (g/cm ³)
1	Cc x Ct	0,545 b
2	Cc x Ct	0,506 a
3	Cc x Ct	0,597 c
Média Cruzamento		0,549
4	Ct x Cc	0,545 b
5	Ct x Cc	0,641 d
6	Ct x Cc	0,586 c
7	Ct x Cc	0,545 b
Média Cruzamento		0,579
Média Geral		0,566
CVe (%)		1,86

Valores médios seguidos da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

$Cc \times Ct = C. citriodora \times C. torelliana$; $Ct \times Cc = C. torelliana \times C. citriodora$.

De acordo com a Tabela 2, o clone 5 apresentou a maior densidade básica média da madeira, diferindo, significativamente, dos demais clones, enquanto o clone 2 apresentou o menor valor. O material procedente de Itamarandiba apresentou variação na densidade básica entre $0,506 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,641 \text{ g.cm}^{-3}$.

O cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* apresentou o clone de maior densidade básica (clone 5), além do maior valor médio ($0,579 \text{ g.cm}^{-3}$). O cruzamento *C. citriodora* x *C. torelliana* apresentou densidade básica média de $0,549 \text{ g.cm}^{-3}$.

As médias de densidade básica dos híbridos, procedentes de Itamarandiba, foram maiores que as normalmente encontradas na literatura para o gênero *Eucalyptus*, por exemplo, nos estudos de Castro (2011), Frederico (2009), Soares (2011) e Sturion, Pereira e Chemin (1988), com idades entre 3 a 5 anos.

A densidade básica média da madeira do material plantado, em Dionísio, variou de $0,487$ a $0,625 \text{ g.cm}^{-3}$. Observa-se, na Tabela 3, que os clones 12, 8 e 13 apresentaram os maiores valores médios de densidade básica da madeira, $0,625$, $0,593$ e $0,579 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente, mas, estatisticamente, não diferiram entre si.

Tabela 3 - Valores médios da densidade básica (DB) da madeira nos diferentes clones localizados em Dionísio

Clones	Cruzamento	DB (g/cm ³)
8	Cc x Ct	0,593 B
9	Cc x Ct	0,487 A
10	Cc x Ct	0,534 A
Média Cruzamento		0,538
11	Ct x Cc	0,523 A
12	Ct x Cc	0,625 B
13	Ct x Cc	0,579 B
Média Cruzamento		0,576
Média		0,557
CVe (%)		5,77

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Os valores apresentados por Couto (2014) para o *Corymbia citriodora* aos sete anos e por Brocco et al. (2012) e Eleotério et al. (2015) com *Corymbia torelliana* estão dentro da faixa dos valores encontrados no híbrido plantado em Dionísio. Porém, Assis (2012) obteve 0,622 g.cm⁻³ para a densidade básica de *C. citriodora* x *C. torelliana* e 0,643 g.cm⁻³ para o *C. torelliana* x *C. citriodora*, aos sete anos de idade, valores que, no geral, são maiores que os encontrados, no presente trabalho, nos dois locais de estudo.

O cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* apresentou o clone de maior densidade (clone 12), além de ter a maior média dessa propriedade que foi de 0,576 g.cm⁻³. O cruzamento *C. citriodora* x *C. torelliana* obteve o clone de menor densidade básica média (clone 9) e o menor valor médio, que foi de 0,538 g.cm⁻³.

Verificou-se que a densidade básica média da madeira foi maior no cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora*, nos dois locais estudados, corroborando com o encontrado no estudo de Assis (2012).

Com exceção do clone 9 ($0,487 \text{ g.cm}^{-3}$), os valores observados no presente trabalho foram maiores que os citados por Trugilho et al. (2001). De acordo com estes autores, a densidade básica da madeira, para produção de carvão vegetal, deve ser superior a $0,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

É importante madeiras de altas densidades, porque apresentam maior produção de carvão vegetal, para um determinado volume de madeira enfiada, além de o produto apresentar melhor qualidade para suas diversas finalidades.

Segundo Vital (1984), há tendência de a densidade básica aumentar com a maturidade da árvore como consequência do aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células. Fato que não ocorreu, neste trabalho, pois os clones dos materiais plantados em Dionísio (6,42 anos) apresentaram resultados semelhantes aos clones de Itamarandiba (3,75 anos), com o material genético de Itamarandiba apresentando a maior média e o clone de densidade mais elevada. Esse resultado pode ser justificado pelo fato dos clones serem procedentes de locais diferentes de plantio, assim como relativo ao fator genético, que interferem, decisivamente, no desenvolvimento do material.

5.1.2 Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira

A Tabela 4 apresenta a variação do Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira dos materiais genéticos plantados em Itamarandiba. A análise de variância mostrou que houve efeito significativo de clone, a 5% de probabilidade. O PCS da madeira apresentou valor médio geral de $4611 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e variação de $4550 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (clone 7) a $4670 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (clone 2). Os clones 2, 3, 4 e 6 apresentaram os maiores valores de PCS, diferindo, estatisticamente, dos clones 1, 5 e 7, que apresentaram os menores valores.

Tabela 4 - Valores médios do poder calorífico superior (PCS) da madeira nos diferentes clones localizados em Itamarandiba.

Clones	Cruzamento	PCS (kcal.kg ⁻¹)
1	Cc x Ct	4577 a
2	Cc x Ct	4670 b
3	Cc x Ct	4623 b
Média Cruzamento		4623
4	Ct x Cc	4659 b
5	Ct x Cc	4584 a
6	Ct x Cc	4617 b
7	Ct x Cc	4550 a
Média Cruzamento		4603
Média Geral		4611
CVe (%)		1,06

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Para o material procedente de Dionísio não foi observado efeito significativo de clone, a 5% de probabilidade. A variação média do PCS da madeira desses clones está compreendida entre 4568 kcal.kg⁻¹ (clone 12) a 4609 kcal.kg⁻¹ (clone 10), com média geral de 4589 kcal.kg⁻¹ (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores médios do poder calorífico superior (PCS) da madeira nos diferentes clones localizados em Dionísio.

Clones	Cruzamento	PCS (kcal.kg ⁻¹)
8	Cc x Ct	4607 A
9	Cc x Ct	4570 A
10	Cc x Ct	4609 A
Média Cruzamento		4595
11	Ct x Cc	4587 A
12	Ct x Cc	4568 A
13	Ct x Cc	4593 A
Média Cruzamento		4583
Média Geral		4589
CVe (%)		0,88

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Observou-se, no presente estudo, que os valores de PCS da madeira apresentaram similaridade numérica entre os dois locais e entre os cruzamentos, apesar de os clones de Itamarandiba e o cruzamento *C. citriodora* x *C. torelliana* terem apresentado maiores valores médios.

Soares (2011) verificou que, em função da idade, há uma ligeira diminuição do PCS da madeira, essa tendência, também, pode ser observada no presente estudo, mesmo os plantios sendo em locais diferentes. Este fato deve estar relacionado à modificação da composição química da madeira com o aumento da idade.

O PCS da madeira apresenta pequena variação dentro de um mesmo gênero, o que pode ser observado no presente trabalho e nos trabalhos de Couto (2014), Pereira, Schaitza e Baggio (2000) e Zanúncio (2013), que analisaram o gênero *Corymbia* e obtiveram valores próximos aos observados no presente trabalho.

A quantidade de calor desprendida da madeira é muito importante para conhecer a capacidade energética de uma determinada espécie. Algumas variáveis afetam essa capacidade energética, como a composição química, principalmente, o teor de extrativos, teor de cinzas e o teor de lignina, sendo a lignina o componente mais energético da madeira em decorrência do alto nível de aromaticidade, tamanho, arranjo de sua estrutura e elevado teor de carbono, então, espera-se que uma madeira com maior teor de ligninas tenha, também, maior PCS (SANTOS, 2010).

O poder calorífico é influenciado de forma negativa pela umidade, em virtude da perda de calor nos gases de combustão, em forma de vapor de água, já que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão, ou seja, precisa de energia para evaporá-la.

Por estar associado à liberação de energia da madeira, durante a queima, o poder calorífico é importante, na seleção de espécies com melhores características, para fins energéticos. A quantidade de calor desprendida da madeira é fundamental no conhecimento da capacidade energética de das espécies (SANTOS, 2010).

5.1.3 Composição química da madeira

Os resultados da composição química da madeira estão apresentados adiante.

5.1.3.1 Composição elementar

A composição elementar é uma propriedade importante, quando a biomassa é usada, para a produção de energia e na análise do processo de combustão. Deve-se ressaltar que os teores dos elementos na madeira podem sofrer influências do tipo de solo e adubação.

Os valores médios da composição elementar da madeira dos diferentes clones procedentes de Itamarandiba estão apresentados na Tabela 6. Verifica-se

que o efeito de clone foi não significativo para todas as características da composição química elementar da madeira.

Tabela 6 - Valores médios de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e oxigênio (O) da madeira dos diferentes clones em Itamarandiba

Clones	Cruzamento	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
1	Cc x Ct	45,66 a	5,63 a	0,76 a	47,94 a
2	Cc x Ct	43,59 a	5,48 a	0,81 a	50,12 a
3	Cc x Ct	44,33 a	5,53 a	0,77 a	49,37 a
Média Cruzamento		44,53	5,55	0,78	49,14
4	Ct x Cc	45,11 a	5,57 a	0,81 a	48,51 a
5	Ct x Cc	45,26 a	5,60 a	0,78 a	48,37 a
6	Ct x Cc	45,44 a	5,61 a	0,75 a	48,20 a
7	Ct x Cc	45,05 a	5,56 a	0,85 a	48,54 a
Média Cruzamento		45,22	5,59	0,80	48,41
Média Geral		44,92	5,57	0,79	48,72
CVe (%)		4,21	4,55	8,31	4,40

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

De acordo com a Tabela 6, o material de Itamarandiba possui variação da composição elementar da madeira de: C (43,59% a 45,66%), H (5,48% a 5,63%), O (47,94% a 50,12%) e N (0,75% a 0,85%). Em relação aos materiais com idades próximas a esses clones, Castro (2011), Protásio et al. (2014) e Soares (2011) apresentaram valores semelhantes de C e O, valores menores de N e maiores de H.

Na Tabela 7, encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla, realizado no material genético, procedente de Dionísio. Observa-se que o efeito de clone foi significativo, a 5% de probabilidade, apenas para o teor de hidrogênio.

Tabela 7 - Valores médios de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e oxigênio (O) da madeira dos diferentes clones em Dionísio

Clones	Cruzamento	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
8	Cc x Ct	48,59 A	5,81 B	0,58 A	44,58 A
9	Cc x Ct	48,47 A	5,84 B	0,56 A	44,75 A
10	Cc x Ct	48,71 A	5,85 B	0,58 A	44,59 A
Média Cruzamento		48,59	5,83	0,57	44,64
11	Ct x Cc	47,00 A	5,51 A	0,58 A	46,29 A
12	Ct x Cc	48,44 A	5,75 B	0,58 A	44,85 A
13	Ct x Cc	47,88 A	5,69 B	0,57 A	45,46 A
Média Cruzamento		47,77	5,65	0,58	45,53
Média Geral		48,18	5,74	0,58	45,09
CVe (%)		2,44	3,04	11,86	2,74

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

De modo geral, constatou-se, em diversos trabalhos encontrados na literatura, que não há grandes diferenças em relação à composição química elementar da madeira (CASTRO, 2011; COUTO, 2014; RAAD, 2004; SANTOS, 2010). De acordo com Penedo (1980), ao desconsiderar as quantidades mínimas de nitrogênio e de outros elementos, como o enxofre, a madeira é constituída de, aproximadamente, 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio, valores que estão em conformidades com os verificados no material procedente de Dionísio.

É importante salientar que os materiais genéticos, do presente estudo, nos dois locais, quando comparado com a literatura, apresentam maiores valores de nitrogênio e menores de hidrogênio.

As madeiras com maiores teores de carbono e hidrogênio possuem maior capacidade térmica em virtude da maior liberação de energia na reação de combustão. O carbono na queima direta é totalmente consumido, enquanto na produção de carvão vegetal, o carbono é convertido em carbono fixo e é o

principal responsável pela energia estocada no carvão. O hidrogênio libera, durante a queima, mais energia do que o carbono e, apesar de estar na madeira em pequenas quantidades, apresenta grande importância na geração de energia. Por outro lado, durante a produção de carvão vegetal, à medida que se degrada a madeira, ocorre uma concentração de carbono e um decréscimo nos teores de nitrogênio e hidrogênio.

Ao contrário do carbono e do hidrogênio, o oxigênio contribui, negativamente, para o poder calorífico, sendo assim, compostos com maiores teores de oxigênio implicam menor energia armazenada.

5.1.3.2 Composição química estrutural (lignina, extrativos, holocelulose e minerais)

Os valores médios da composição química das madeiras dos diferentes materiais genéticos procedentes de Itamarandiba estão apresentados na Tabela 8. A análise de variância indicou que o efeito de clone foi significativo, para os extrativos totais, holocelulose e minerais, sendo não significativo para o teor de lignina.

Tabela 8 - Valores médios de extrativos (EXT), lignina (LIG), holocelulose (HOLO) e cinzas (CZ) da madeira dos diferentes clones localizados em Itamarandiba, em porcentagem

Clones	Cruzamento	EXT	LIG	HOLO	CZ
1	Cc x Ct	12,70 d	26,16 a	60,16 a	0,97 d
2	Cc x Ct	4,46 a	26,00 a	68,99 c	0,55 b
3	Cc x Ct	6,72 b	25,90 a	67,09 b	0,29 a
Média Cruzamento		7,96	26,02	65,41	0,60
4	Ct x Cc	10,35 c	26,24 a	62,57 b	0,84 c
5	Ct x Cc	9,46 c	25,71 a	64,05 b	0,78 c
6	Ct x Cc	8,69 c	26,94 a	63,60 b	0,77 c
7	Ct x Cc	9,15 c	27,31 a	63,02 b	0,52 b
Média Cruzamento		9,41	26,55	63,31	0,73
Média Geral		8,79	26,32	64,21	0,67
CVe (%)		14,79	6,39	3,11	18,08

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Pela Tabela 8, observa-se que o clone 1 apresentou o maior teor de extrativos totais (12,70%), diferindo, significativamente, dos demais. Observou-se grande amplitude para o teor de extrativos e que o cruzamento *C. citriodora* x *C. torelliana* teve o clone com o maior valor de extrativos, porém o cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* apresentou valor médio maior para o teor de extrativos totais, cerca de 9,41%, enquanto o *C. citriodora* x *C. torelliana* foi de 7,96%.

No geral, esses resultados são superiores ao encontrado na literatura, por exemplo, Castro (2011), Pereira (2012) e Santos (2010), encontraram teores de extrativos totais variando de 2,37% a 5,0% para *Eucalyptus* spp. com idades entre três a 7,5 anos. Contudo, esses resultados são similares aos encontrados por Couto (2014) que encontrou 8,37% de extrativos totais no *C. citriodora* aos sete anos e Soares (2011), para híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* com três, cinco e sete anos apresentou média de 9,04% de extrativos. Nota-se que os

clones 1, 4, 5 e 7 apresentaram ainda assim valores superiores de extrativos totais.

Não é desejável a presença de elevados teores de extrativos, pois esses compostos se degradam a baixas temperaturas, com isso, é melhor que a madeira tenha maiores quantidades de compostos mais estáveis, termicamente, por exemplo, a lignina. Todavia dependendo da natureza química os extrativos podem favorecer o aumento do poder calorífico do carvão e ter um maior rendimento em carbono fixo.

O teor de lignina foi pouco variável e com valores entre 25,71% a 27,31% e o valor médio observado, neste trabalho, foi de 26,32% para os clones de Itamarandiba. Esses valores são inferiores ao encontrado na literatura para *Eucalyptus* com idades próximas a esse material (CASTRO, 2011; FREDERICO, 2009; PROTÁSIO et al., 2014; TRUGILHO et al., 2015).

Os cruzamentos apresentaram valores semelhantes, já que não houve efeito de clone para essa propriedade da madeira. O *C. citriodora* x *C. torelliana* obteve 26,02% de teor de lignina e o *C. torelliana* x *C. citriodora* teor de lignina de 26,55%.

Os clones 2 e 3 apresentaram diferenças significativas entre si e foram os de maior porcentagem de holocelulose, 68,99% e 67,09%, respectivamente. O clone 1 apresentou menor teor médio de holocelulose, o inverso ocorreu com o clone 2. O teor de holocelulose variou de 60,16% a 68,99% e obteve média de 64,21%. Esses valores obtidos, no presente estudo, são inferiores a Frederico (2009), Protásio et al. (2014), Trugilho et al. (2015) e Trugilho, Lima e Mendes (1996), para clones de *Eucalyptus* com idades próximas ao do material de Itamarandiba.

Os valores obtidos para o teor de cinzas apresentaram amplitude alta para a madeira verificando diferenças significativas entre os clones de Itamarandiba. O clone 1 obteve o maior teor de cinzas diferindo,

estatisticamente, dos demais, já o clone 3 apresentou menor valor em relação aos outros clones.

A variação foi de 0,29% a 0,97% com média de 0,67%. Verificou-se que o material dessa localidade obteve valores superiores de cinzas no que se refere ao encontrado na literatura (SOARES, 2011; TRUGILHO et al., 2015; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

A presença de altos teores de cinzas na madeira não é desejada, para produção de carvão vegetal, em razão de que, após a carbonização, é formado um resíduo, dado que essa propriedade não é degradada no processo, por consequência, contribui para a redução do PCS do carvão vegetal (FREDERICO, 2009). Além do mais, o alto teor de cinzas na madeira aumenta, também, no carvão vegetal, não sendo interessante, na produção de alguns tipos de ferro-liga, visto que o carvão se torna quebradiço, menos maleável e com campos favoráveis à propagação de trincas e fissuras (ROCHA, 2011).

Os valores médios da composição química das madeiras dos diferentes materiais genéticos, procedentes de Dionísio, estão apresentados na Tabela 9. A análise de variância indicou que o efeito de clone foi significativo para os extrativos totais, holocelulose e minerais, sendo não significativo para o teor de lignina. Mesmo resultado encontrado nos genótipos plantados em Itamarandiba.

Tabela 9 - Valores médios de extrativos (EXT), lignina (LIG), holocelulose (HOLO) e cinzas (CZ) da madeira dos diferentes clones localizados em Dionísio, em porcentagem

Clones	Cruzamento	EXT	LIG	HOLO	CZ
8	Cc x Ct	4,03 B	28,35 A	67,18 A	0,44 A
9	Cc x Ct	2,12 A	28,26 A	69,24 B	0,38 A
10	Cc x Ct	2,09 A	26,47 A	71,18 B	0,27 A
Média Cruzamento		2,75	27,69	69,20	0,36
11	Ct x Cc	4,84 B	28,42 A	66,12 A	0,62 B
12	Ct x Cc	4,50 B	27,45 A	67,68 A	0,38 A
13	Ct x Cc	4,81 B	28,15 A	66,66 A	0,39 A
Média Cruzamento		4,72	28,01	66,82	0,46
Média Geral		3,73	27,85	68,01	0,41
CVe (%)		28,43	4,43	2,44	31,49

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Pela Tabela 9 pode-se observar que os clones 2 e 3 apresentaram menores teores de extrativos totais, 2,12% e 2,09%, respectivamente, não diferindo, estatisticamente, entre si. O clone 11 (4,84%) apresentou maior teor de extrativos, entretanto não apresentou diferenças significativas em relação aos clones 8, 12 e 13. O teor de holocelulose foi o inverso do que ocorreu com os extrativos totais, já que os clones 9 e 10 apresentaram os maiores valores de holocelulose, diferindo, estatisticamente, dos demais. O clone 10, também, teve o menor valor médio de lignina. O teor de lignina total ficou entre 26,47% e 28,42%.

O teor de extrativos totais no cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* (4,72%) foi maior que no *C. citriodora* x *C. torelliana* (2,75%).

Os materiais genéticos de Dionísio apresentaram valores semelhantes ao encontrado por Castro (2011), Pereira (2012) e Santos (2010). Os autores Santana (2009) e Silva (2011), estudando clones híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, nas idades de três, quatro, cinco, seis e sete anos e de quatro, cinco,

seis e sete anos, verificaram aumento no teor de extrativos totais da madeira com o incremento da idade. A relação da idade com o aumento no teor de extrativos pode ser explicado pelo processo de cernificação, ou seja, a conversão do alburno em cerne, ocorrendo a morte de células e modificações na sua constituição química. Contudo, no presente estudo, o material de Itamarandiba (mais jovem) apresentou maiores teores de extrativos totais em relação ao material de Dionísio (material mais maduro), contrariando o verificado por Santana (2009) e Silva (2011) com clones de eucaliptos. Este fato está relacionado às diferenças entre os genótipos e o local de plantio.

O teor de lignina apresentou valores próximos, para os clones localizados em Dionísio, 26,47% a 28,42% e o valor médio de 27,85%. Esse valor é superior ao encontrado por Couto (2014) e Pereira et al. (2000) para o *C. citriodora*. Ao contrário dos autores citados anteriormente, Castro (2011) e Pereira (2012) obtiveram valores superiores que variaram entre 28,8% a 33,8% para *Eucalyptus* spp. com idades de três, quatro, cinco e sete.

Observa-se que o teor médio de lignina dos materiais dos dois locais de estudo foi próximo, porém os clones de Dionísio apresentaram valor ligeiramente maior. O mesmo efeito ocorreu com os cruzamentos, em que a diferença foi pequena, entretanto o *C. torelliana* x *C. citriodora* apresentou valor superior.

De acordo com a Tabela 9, os materiais genéticos apresentaram variação de 66,12% a 71,18%, para o teor de holocelulose, com média de 68,01%. Esses valores são maiores que os encontrados por Santos (2010), para híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. camaldulensis* x *E. grandis*, aos sete anos e maiores que Couto (2014), com *Corymbia citriodora*, aos sete anos. Entretanto, está dentro do encontrado por Pereira (2012) com *Eucalytus* spp. aos 7,5 anos e Soares (2011) com madeiras de *E. urophylla* x *E. grandis* aos sete anos, que foram de 69,93% e 72,42%, respectivamente.

Entre os cruzamentos, a diferença foi pequena no teor de holocelulose, mesmo que o *C. torelliana* x *C. citriodora* tenha apresentado maiores valores de lignina e menores de holocelulose no material de Dionísio. Resultado interessante do ponto de vista do uso energético da madeira.

Os clones, procedentes de Dionísio, apresentaram valor médio de holocelulose de 68,01%, enquanto os materiais, em Itamarandiba, obtiveram 64,21%. Este fato pode estar relacionado ao material mais novo ter apresentado valores mais elevados de extrativos totais.

A porcentagem de holocelulose corresponde a uma parte da fração mais significativa da massa da madeira e é representada pelos componentes estruturais que são os carboidratos, assim, a celulose e as hemiceluloses apresentam um perfil bastante instável e pouco resistente colaborando para maior degradação. Com isso, não são desejáveis altas porcentagens desses compostos quando se pretende utilizar a madeira para a produção de carvão, visto que a degradação desses componentes resulta em maiores porcentagens de gases não condensáveis e gases condensáveis em detrimento da formação do resíduo sólido, o carvão vegetal (SANTOS, 2010).

Nos clones de Dionísio, o clone 11 foi, estatisticamente, diferente dos outros clones. Esses materiais apresentaram variação das cinzas de 0,27% a 0,62% com média de 0,41%. Couto (2014), para o *Corymbia citriodora*, aos sete anos, observou valores em torno de 0,42%, próximo à média encontrada para o material deste estudo. Pereira (2012) analisou *Eucalyptus* sp. com 7,5 anos obtendo variação entre 0,10% a 0,18%.

Trugilho, Lima e Mendes (1996) identificaram mais cinzas nos materiais mais novos, no *Eucalyptus saligna* com um, dois, três e quatro anos apresentaram os seguintes resultados: 0,70%, 0,53%, 0,28% e 0,22%, respectivamente. Essa mesma tendência foi observada neste trabalho. O teor de cinzas diminui, significativamente, com a maturidade da árvore, provavelmente,

em decorrência da diminuição da atividade fisiológica da árvore com a idade, exigindo, portanto, menor presença de componentes minerais.

Observa-se, de maneira geral, que os dois materiais, em média, exibiram resultados superiores aos encontrados na literatura em comparação às respectivas idades. Da mesma forma, o cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* foi o que apresentou maiores valores de cinzas nos dois locais analisados.

5.1.4 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

As Figuras 2 e 3 representam a degradação térmica dos materiais genéticos nas duas localidades consideradas com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Observa-se que houve diferenças na decomposição térmica, ou seja, ocorreu variação de massas residuais finais.

A degradação térmica da madeira é, normalmente, definida como a soma das reações térmicas da degradação dos seus três principais componentes: celulose, hemiceluloses e lignina (LE VAN, 1992). Verifica-se que há pequenas diferenciações nas temperaturas relacionadas aos picos de degradação, isso pode ser em decorrência da degradação das hemiceluloses e celulose, principalmente.

Nas Figuras 2 e 3, observam-se, também, as curvas da derivada primeira das curvas termogravimétricas (DTG) e apresentam a variação da massa em relação ao tempo, em função da temperatura. Observam-se picos em que a velocidade de decomposição da biomassa é máxima, com isso, pode-se identificar as temperaturas em que ocorrem as principais perdas de massa.

Figura 2 - Termogramas dos clones localizados em Itamarandiba.

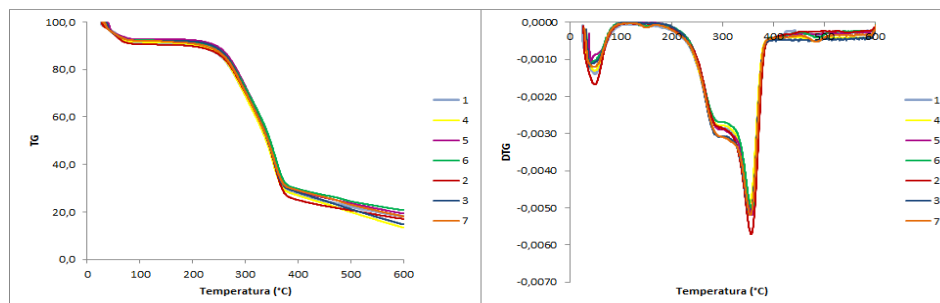
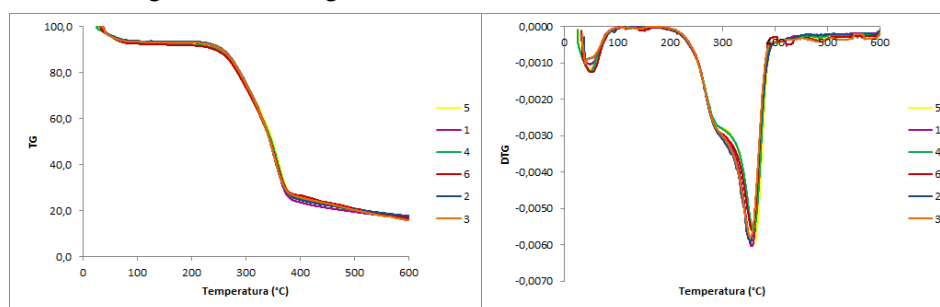


Figura 3 - Termogramas dos clones localizados em Dionísio.



Alguns estudos mostram que a pirólise da madeira pode ser dividida em quatro faixas de degradação: secagem, degradação da celulose, hemiceluloses e lignina. Verificam-se três faixas de perda de massa nas curvas TG/DTG: a primeira está relacionada à secagem da madeira e as outras duas à degradação de seus principais componentes (hemiceluloses, celulose e lignina), porém cada componente se degrada de forma distinta em faixas de temperatura diferentes. Por causa da ampla faixa de degradação térmica não é possível determinar uma faixa específica para a lignina.

O pico da perda de massa da celulose é após a degradação das hemiceluloses, porque a despolimerização da cadeia de celulose necessita de maior energia, o que lhe confere maior estabilidade térmica, dificultando a quebra de seus monômeros. A lignina é o componente que apresenta a maior

estabilidade térmica em virtude das ligações carbono-carbono entre as unidades monoméricas de fenilpropano e, conseqüentemente, da estabilidade de sua matriz aromática, além de apresentar elevada massa molecular.

Poletto et al. (2012) relatam que, na segunda etapa de decomposição térmica (aproximadamente de 210°C a 320°C), ocorre, em sua maioria, a degradação das hemiceluloses e início da decomposição da celulose. As taxas máximas de perda de massa foram alcançadas em temperaturas entre 300°C e 350°C, em sua maioria, nessa faixa de temperatura, ocorre a degradação da celulose e de parte da lignina. Com base em temperaturas superiores a 350°C, verifica-se que a degradação térmica foi diminuindo, em razão da maior parte dos componentes químicos da madeira, celulose e hemiceluloses, principalmente, já terem sido degradadas.

As Tabelas 10 e 11 apresentam as perdas de massa dos materiais por faixas de temperatura. Observa-se que as maiores perdas de massa ocorreram, respectivamente, nas faixas de temperatura entre 300 a 350°C e 350 a 450°C, a média de perda de massa, nessas duas faixas, foi de 55,86% e 62,57% para o material de Itamarandiba e Dionísio, respectivamente. A partir de 350°C, as perdas de massa são menos acentuadas, pois, nessas fases, ocorrem somente a degradação residual da holocelulose e pouca degradação da molécula de lignina.

Constatou-se que, na faixa de temperatura compreendida entre 150 e 250°C, a perda de massa foi a menor, em média, 4,08% e 2,52%, respectivamente, para o material procedente de Itamarandiba e Dionísio. Em geral, os componentes da madeira são, termicamente, estáveis nessa faixa de temperatura, desde que não sejam expostos ao calor por períodos prolongados (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006).

Tabela 10 - Valores médios da perda de massa da madeira nos clones localizados em Itamarandiba, em função das faixas de temperatura e massa residual, em porcentagem

Clone	Faixa de temperatura (°C)					Massa Residual
	150-250	250-300	300-350	350-450	450-600	
1	4,70	16,71	24,96	20,03	6,44	27,17
2	4,05	15,97	25,86	22,06	5,50	26,55
3	3,63	17,60	26,15	20,36	10,04	22,22
4	4,72	17,62	25,98	19,37	10,14	22,16
5	3,42	16,35	25,32	21,38	6,34	26,90
6	3,67	15,94	24,04	21,07	6,33	28,96
7	4,35	16,76	25,36	19,12	8,09	26,32

Tabela 11 - Valores médios da perda de massa da madeira nos clones localizados em Dionísio, em função das faixas de temperatura e massa residual, em porcentagem

Clones	Faixa de temperatura (°C)					Massa Residual
	150-250	250-300	300-350	350-450	450-600	
8	2,36	15,75	29,03	24,73	4,63	23,50
9	2,43	15,47	30,21	20,56	4,58	24,35
10	2,25	15,54	29,43	22,65	7,33	22,80
11	2,72	15,39	26,04	25,73	5,46	24,65
12	2,48	15,11	25,12	27,35	5,81	24,12
13	2,90	15,62	27,04	22,97	6,70	24,77

Os valores de massas residuais da madeira nos clones mais jovens variaram entre 22,16% a 28,96% apresentando maior amplitude em comparação de Dionísio que foi entre 22,8% e 24,77%. Os clones 6 e 1 de Itamarandiba apresentaram maiores valores de massa residual, da mesma forma que o cruzamento *C. torrelliana* x *C. citriodora* obteve maiores massas residuais nos dois locais estudados. Visando à obtenção de madeira para produção de energia, espera-se que os materiais, que apresentaram maiores massas residuais, propiciem maiores rendimentos em carvão vegetal, em razão de sua maior estabilidade térmica.

5.2 Propriedades do carvão vegetal

Em seguida estão apresentados os resultados das propriedades do carvão vegetal.

5.2.1 Rendimentos da carbonização

As Tabelas 12 e 13 mostram a variação do rendimento médio em carvão vegetal (RGC), em líquido pirolenhoso (RLP) e em gases não condensáveis (RGNC) dos clones procedentes de Itamarandiba e Dionísio, respectivamente.

Tabela 12 - Valores médios dos rendimentos gravimétricos da carbonização nos diferentes clones localizados em Itamarandiba, em porcentagem

Clones	Cruzamento	RGC	RLP	RGNC
1	Cc x Ct	35,85 a	42,29 a	21,86 a
2	Cc x Ct	33,87 a	46,44 a	19,68 a
3	Cc x Ct	36,26 a	43,66 a	20,07 a
Média Cruzamento		35,33	44,13	20,54
4	Ct x Cc	34,99 a	43,14 a	21,88 a
5	Ct x Cc	34,63 a	44,68 a	20,70 a
6	Ct x Cc	35,63 a	42,02 a	22,35 a
7	Ct x Cc	34,31 a	46,12 a	19,57 a
Média Cruzamento		34,89	43,99	21,13
Média Geral		35,08	44,05	20,87
CVe (%)		4,21	8,52	15,60

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Pela Tabela 12, verifica-se que nenhuma das características de rendimento apresentou efeito significativo de material genético. O RGC do material de Itamarandiba variou de 33,87% a 36,23%, sendo a média de 35,08% maior ao encontrado na literatura para *Eucalyptus* com idades próximas. Por exemplo, no trabalho de Frederico (2009), Protásio et al. (2014) e Soares (2011), utilizando a mesma marcha de carbonização do presente estudo, obtiveram

valores entre 28,36% a 33,00% para o RGC. Em relação a esses mesmos autores, o RLP desse trabalho apresentou valores semelhantes ao encontrado na literatura, com média de 44,05%. O RGNC apresentou média de 20,87%, valor inferior ao que foi verificado nos trabalhos citados acima.

O resultado do material de Itamarandiba apresentou maior valor médio de RGC, semelhantes de RLP e menor de RGNC, em relação ao estudo de Pereira et al. (2000), com o *C. citriodora*, aos dez anos e meio de idade, porém esse autor carbonizou com taxa de aquecimento de 1,0°C, por minuto, com ciclo total de carbonização de oito horas e temperatura máxima de 500°C.

Maiores valores de rendimento gravimétrico em carvão são desejáveis, pois resulta em maior massa de carvão vegetal e, conseqüentemente, maior produtividade dos fornos.

Tabela 13 - Valores médios dos rendimentos gravimétricos da carbonização nos diferentes clones localizados em Dionísio, em porcentagem

Clones	Cruzamento	RGC	RLP	RGNC
8	Cc x Ct	33,01 A	41,98 A	25,01 B
9	Cc x Ct	32,52 A	46,57 B	20,92 A
10	Cc x Ct	33,04 A	46,88 B	20,08 A
Média Cruzamento		32,86	45,14	22,00
11	Ct x Cc	34,11 A	44,49 A	21,40 A
12	Ct x Cc	33,35 A	43,30 A	23,35 B
13	Ct x Cc	32,99 A	43,00 A	24,01 B
Média Cruzamento		33,48	43,60	22,92
Média Geral		33,17	44,37	22,46
CVe (%)		2,46	5,59	11,55

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Pela Tabela 13, observa-se que o RGC variou de 32,52% a 34,11%, com média de 33,17%. O RLP foi maior para os clones 2 e 3, sendo, estatisticamente,

diferentes dos clones 8, 11, 12 e 13. Para o RGNC, maiores valores e, estatisticamente, diferentes dos demais ocorreram nos clones 8, 12 e 13. Os clones 12 e 13 apresentaram valores opostos de RLP, maiores valores, e RGNC, menores valores.

O RGC para *C. citriodora*, nos estudos de Couto (2014), Takarada (2015) e Zanúncio (2013), com idades semelhantes ao material de Dionísio, foi de 30,02%, 35,95% e 36,81%, respectivamente. Couto (2014) empregou a mesma taxa de carbonização do atual estudo, porém Zanúncio (2013) utilizou taxa de aquecimento de 1,67°C/minuto, temperatura final de 350°C com tempo de residência de 30 minutos e Takarada (2015) usou taxa de aquecimento de 1,0°C por minuto e temperatura máxima de 400°C permanecendo estabilizada por 30 minutos.

Os resultados encontrados, no presente trabalho, encontram-se de acordo com os valores de literatura para o *C. citriodora*.

Pereira (2011) observou redução do RGC com o aumento da idade para madeira de *E. benthamii* e os valores médios variaram de 29,70% a 27,05%, aos três e aos sete anos, respectivamente. Esse fato observou-se nos materiais genéticos do *Corymbia*, no presente estudo, pois o material de Itamarandiba (3,75 anos) obteve 35,08% de média e o material de Dionísio (6,42 anos) apresentou 33,17% de rendimento gravimétrico.

Essa diferença, em relação ao RGC, pode ser justificada pelo efeito do local interferindo na composição química da madeira, visto que Brito e Barrichelo (1977) verificaram que a carbonização de madeiras com maiores teores de extrativos tem certa influência no rendimento gravimétrico em carvão. Di Blasi (1998) e Frederico (2009) obtiveram rendimentos superiores em carvão vegetal a partir da carbonização de madeiras com os maiores teores de extrativos totais, tal fato ocorreu, no presente estudo, dado que o material de Itamarandiba apresentou maiores teores de extrativos e maior RGC.

A composição química e as demais propriedades do carvão vegetal são fortemente influenciadas pela temperatura final da carbonização e taxa de aquecimento. No presente estudo, estas duas variáveis foram as mesmas para todas as carbonizações.

Em relação aos cruzamentos os valores foram semelhantes, pois o cruzamento *C. citriodora* x *C. torelliana* teve RGC de 34,09% de média, 35,33% em Itamarandiba e 32,86% em Dionísio, e o *C. torelliana* x *C. citriodora*, com média de 34,19%, 34,89 em Itamarandiba e 33,48% em Dionísio. Observa-se que, no material de Itamarandiba, o *C. citriodora* x *C. torelliana* apresentou maiores valores médios que o *C. torelliana* x *C. citriodora*, entretanto, em Dionísio, ocorreu o inverso.

O rendimento em carvão vegetal está intimamente relacionado à composição química da madeira, no que se diz respeito a elevados teores de lignina. Nota-se que, no material de Dionísio, o clone 11 apresentou o maior teor de lignina e o maior rendimento, contudo essa tendência não foi observada nos outros clones. É, também, importante salientar que o teor de lignina e o rendimento, nos dois locais, não apresentaram diferença significativa, a 5% de probabilidade.

5.2.2 Densidade relativa aparente do carvão vegetal

As Tabelas 14 e 15 mostram a variação da densidade relativa aparente do carvão vegetal dos diferentes clones nos dois locais estudados. Pela análise de variância verificou-se que o efeito de clone foi significativo para as duas localidades.

Tabela 14 - Valores médios da densidade relativa aparente (DRA) do carvão nos diferentes clones localizados em Itamarandiba

Clones	Cruzamento	DRA (g/cm ³)
1	Cc x Ct	0,426 c
2	Cc x Ct	0,358 a
3	Cc x Ct	0,443 c
Média Cruzamento		0,409
4	Ct x Cc	0,406 b
5	Ct x Cc	0,501 d
6	Ct x Cc	0,431 c
7	Ct x Cc	0,397 b
Média Cruzamento		0,434
Média Geral		0,423
CVe (%)		3,82

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Pela Tabela 14 observa-se que o clone 5 apresentou a maior densidade relativa aparente do carvão, seguido dos clones 3, 6 e 1 que não diferiram, estatisticamente, entre si. Os clones 4 e 7 apresentaram valores médios intermediários e a menor densidade relativa aparente foi a do clone 2. Comumente, quanto maior a densidade básica da madeira maior, também, a densidade aparente do carvão vegetal, entretanto apenas os clones 2 e 5 seguiram este comportamento, indicando que outros fatores, também, afetam a densidade do carvão além da densidade básica.

Tabela 15 - Valores médios da densidade relativa aparente (DRA) do carvão nos diferentes clones localizados em Dionísio

Clones	Cruzamento	DRA (g/cm ³)
8	Cc x Ct	0,416 C
9	Cc x Ct	0,337 A
10	Cc x Ct	0,405 C
Média Cruzamento		0,386
11	Ct x Cc	0,373 B
12	Ct x Cc	0,419 C
13	Ct x Cc	0,412 C
Média Cruzamento		0,401
Média Geral		0,394
CVe (%)		6,88

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Nas idades de três, cinco e sete anos de *E. benthamii* e *E. urophylla*, Pereira (2011) encontrou valores entre 0,26 g.cm⁻³ a 0,33 g.cm⁻³, além disso esse autor não identificou efeito significativo da idade. Frederico (2009) chegou à densidade aparente entre 0,285 g.cm⁻³ a 0,323 g.cm⁻³ para clones de *Eucalyptus* sp., aos três anos. Esses valores são menores aos encontrados, no presente estudo, onde a densidade relativa variou de 0,358 g.cm⁻³ a 0,501 g.cm⁻³, com média de 0,423 g.cm⁻³. Esse valor médio, também, foi maior que o encontrado nos genótipos plantados em Dionísio (Tabela 15), que apresentaram valor médio de densidade aparente do carvão de 0,394 g.cm⁻³.

As diferenças, na densidade aparente dos carvões, podem ser explicadas pela maior densidade básica da madeira dos clones estudados, visto que o material de Itamarandiba apresentou, também, uma maior média de densidade básica da madeira.

Para o material procedente de Dionísio, a densidade aparente do carvão vegetal apresentou variação de 0,337 a 0,419 g.cm⁻³. Os clones 12, 8, 13 e 10

apresentaram as maiores densidades do carvão, seguidos do clone 11, e o de menor densidade é o clone 9. Observa-se que a sequência dos valores entre a densidade básica da madeira e da densidade relativa aparente do carvão é a mesma, o que mostra a íntima relação entre essas duas características.

Os valores encontrados, para o *C. citriodora*, com idade de seis e sete anos, foram de $0,481 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,430 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente. Como mostrado nos estudos de Couto (2014) e Takarada (2015), são superiores à média do material de Dionísio, porém é similar ao de Itamarandiba. Contudo, Zanúncio (2013) encontrou valor médio superior aos citados acima, que foi de $0,527 \text{ g.cm}^{-3}$.

É provável que, além do provável efeito do local, as diferenças na densidade básica da madeira e na constituição química da madeira analisada por esses autores esclarecem os elevados valores da densidade aparente do carvão, quando comparados aos desta pesquisa, uma vez que, de modo geral, quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade aparente do carvão.

De acordo com Santos (2008), é desejável que a densidade aparente do carvão vegetal não seja inferior a $0,400 \text{ g.cm}^{-3}$, para o uso siderúrgico. Logo, o carvão vegetal dos clones 2 e 7 de Itamarandiba e os clones 9 e 11 de Dionísio não apresentaram valores médios considerados satisfatórios. No entanto, outras propriedades do carvão, também, devem manter-se em níveis aceitáveis, principalmente, o teor de carbono fixo, quanto mais elevada a densidade do carvão vegetal, maior será a utilização do volume do alto-forno, maior resistência mecânica, maior capacidade calorífica por unidade de volume e maior o tempo de residência da carga metálica no equipamento (PIMENTA; BARCELLOS, 2000).

De acordo com os cruzamentos, assim como na densidade básica da madeira, a densidade relativa aparente do carvão teve maiores valores para o *C. torelliana* x *C. citriodora* que apresentaram valores superiores, nos dois locais.

Observa-se que a média de *C. citriodora* x *C. torelliana* ($0,386 \text{ g.cm}^{-3}$) de Dionísio foi abaixo de $0,400 \text{ g.cm}^{-3}$ sugerida por Santos (2008) ao carvão vegetal para uso siderúrgico, até mesmo a média desse material, nas duas localidades ($0,398 \text{ g.cm}^{-3}$), foi inferior a $0,400 \text{ g.cm}^{-3}$.

5.2.3 Poder Calorífico Superior (PCS) do carvão vegetal

As Tabelas 16 e 17 mostram a variação observada no poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal nos dois locais estudados. A análise de variância mostrou que o efeito de clone foi não significativo em nenhum dos locais considerados.

Tabela 16 - Valores médios do poder calorífico superior (PCS) do carvão nos diferentes clones localizados em Itamarandiba

Clones	Cruzamento	PCS (kcal.kg^{-1})
1	Cc x Ct	7358 a
2	Cc x Ct	7445 a
3	Cc x Ct	7354 a
Média Cruzamento		7386
4	Ct x Cc	7342 a
5	Ct x Cc	7388 a
6	Ct x Cc	7308 a
7	Ct x Cc	7432 a
Média Cruzamento		7368
Média Geral		7375
CVe (%)		1,73

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Verificaram -se, no carvão vegetal do material plantado em Itamarandiba, valores médios de PCS variando de $7308 \text{ kcal.kg}^{-1}$ a $7445 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Soares (2011), utilizando a mesma taxa de aquecimento e a mesma temperatura final, na carbonização do presente estudo, obteve valores

ainda mais inferiores para híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* com três anos (7062 kcal.kg⁻¹) e cinco anos (7215 kcal.kg⁻¹). Entretanto, Frederico (2009), com material aos três anos e Protásio et al. (2014), em clones com 46 e 58 meses, empregando a mesma marcha de carbonização do atual trabalho, obtiveram valores entre 7645 kcal.kg⁻¹ e 8315 kcal.kg⁻¹ para clones de *Eucalyptus* que são mais elevados para essa variável em relação ao material estudado.

Tabela 17 - Valores médios do poder calorífico superior (PCS) do carvão nos diferentes clones localizados em Dionísio

Clones	Cruzamento	PCS (kcal.kg ⁻¹)
8	Cc x Ct	7404 A
9	Cc x Ct	7396 A
10	Cc x Ct	7428 A
Média Cruzamento		7409
11	Ct x Cc	7274 A
12	Ct x Cc	7398 A
13	Ct x Cc	7447 A
Média Cruzamento		7373
Média Geral		7391
CVe (%)		1,54

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Os valores para o PCS do carvão, procedente do material plantado em Dionísio, variaram de 7274 kcal.kg⁻¹ a 7447 kcal.kg⁻¹. Valores similares foram encontrados por Zanúncio (2013), que usou taxa de aquecimento de 1,67°C/minuto, temperatura final de 350°C e tempo de residência de 30 minutos, o *C. citriodora* apresentou 7479 kcal.kg⁻¹. Porém, Couto (2014), com taxa de aquecimento de 100°C/hora e temperatura final de 450°C, permanecendo por um período de 30 minutos e Takarada (2015), com taxa de aquecimento de 1,0°C por minuto e temperatura máxima de 400°C, permanecendo estabilizada por 30

minutos, para o *C. citriodora*, encontraram valores menores de 6962 kcal.kg⁻¹ e 6880 kcal.kg⁻¹, respectivamente. Pereira et al. (2000), taxa de aquecimento de 1,0°C por minuto, com ciclo total de carbonização de oito horas e temperatura máxima de 500°C, encontraram PCS do carvão do *C. citriodora* de 8088 kcal.kg⁻¹, valor bem mais elevado que o encontrado neste estudo.

No geral, os valores encontrados neste estudo estão dentro dos valores citados na literatura, desse modo, seus valores são satisfatórios, em relação ao PCS, para o emprego siderúrgico e doméstico. Nota-se que o poder calorífico do carvão está relacionado com o teor de carbono fixo do mesmo e à composição elementar do combustível. Um maior PCS tem, por consequência, menor consumo de carvão vegetal para uma mesma produtividade de ferro-gusa na atividade siderúrgica (FREDERICO, 2009).

5.2.4 Análise química imediata do carvão vegetal

Nas Tabelas 18 e 19, estão os valores médios para os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas do carvão vegetal para os genótipos procedentes de Itamarandiba e Dionísio, respectivamente. A análise de variância mostrou que o efeito de clone foi significativo somente para o teor de cinzas, nos materiais de Itamarandiba (Tabela 18) e, para o teor de carbono fixo e de cinzas, nos genótipos procedentes de Dionísio (Tabela 19).

Tabela 18 - Valores médios dos teores de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas do carvão (CZ) dos diferentes clones de Itamarandiba, em porcentagem

Clones	Cruzamento	MV	CF	CZ
1	Cc x Ct	23,29 a	75,39 a	1,32 b
2	Cc x Ct	22,54 a	76,31 a	1,15 a
3	Cc x Ct	26,57 a	72,54 a	0,89 a
Média Cruzamento		24,13	74,75	1,12
4	Ct x Cc	23,20 a	75,39 a	1,41 b
5	Ct x Cc	23,65 a	75,33 a	1,02 a
6	Ct x Cc	22,78 a	75,76 a	1,46 b
7	Ct x Cc	22,31 a	76,59 a	1,10 a
Média Cruzamento		22,99	75,77	1,25
Média Geral		23,48	75,33	1,19
CVe (%)		10,32	3,19	17,56

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Tabela 19 - Valores médios dos teores de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ) do carvão dos diferentes clones de Dionísio, em porcentagem

Clones	Cruzamento	MV	CF	CZ
8	Cc x Ct	22,68 A	75,62 B	1,67 A
9	Cc x Ct	24,41 A	74,03 B	1,56 A
10	Cc x Ct	23,99 A	74,70 B	1,31 A
Média Cruzamento		23,69	74,78	1,51
11	Ct x Cc	25,11 A	72,77 A	2,12 B
12	Ct x Cc	26,93 A	71,51 A	1,55 A
13	Ct x Cc	24,34 A	74,03 A	1,47 A
Média Cruzamento		25,46	72,77	1,71
Média Geral		24,58	73,81	1,61
CVe (%)		7,73	2,63	15,53

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

A partir da análise química imediata do carvão dos materiais de Itamarandiba (Tabela 18), observa-se que os teores de materiais voláteis variaram de 22,31% a 26,57%, com média de 23,48%. Os valores, no presente estudo, são maiores que o encontrado por Protásio et al. (2014) ao utilizarem taxa de aquecimento de $1,67^{\circ}\text{C min}^{-1}$ na carbonização à temperatura final de 450°C , permaneceu estabilizado, a 450°C por 30 minutos, os autores obtiveram média de 20,2% para o teor de materiais voláteis em *Eucalyptus* spp. com 3,8 e 4,8 anos. Frederico (2009) realizou a carbonização com taxa de aquecimento médio de $1,67^{\circ}\text{C}$, por minuto, temperatura final de 450°C , permanecendo estabilizado 30 minutos e tempo total de carbonização de 4,5 horas e encontrou, também, valores menores que os observados no presente estudo, ao avaliar madeira de cinco clones de eucalipto, aos três anos de idade, os quais variaram de 15,01% a 19,15%.

Segundo Santos (2008), o carvão vegetal deve apresentar teor de materiais voláteis de 20 a 25%, para o uso siderúrgico; nos resultados apresentados em Itamarandiba, apenas o clone 3 (26,57%) obteve valor diferente ao citado pelo autor.

O teor de carbono fixo do carvão do material procedente de Itamarandiba variou de 72,54% a 76,59%, com média de 75,33%. Frederico (2009) encontrou, no carvão dos clones de eucalipto, aos três anos, valores para o teor de carbono fixo entre 80,13% e 83,74%. Sturion, Pereira e Chemin (1988) analisou *E. viminalis*, aos quatro anos, utilizando na carbonização temperatura máxima de 500°C e o ciclo total de cinco horas; fato que indicou um teor de carbono fixo de 78,8% de média. Esses valores são maiores que o encontrado no presente trabalho.

O material localizado em Itamarandiba apresentou valores inferiores de teor de carbono fixo ao verificado na literatura, o que pode estar ligado ao uso de distintas marchas de carbonização, visto que o incremento do teor de carbono

fixo ocorre com o aumento da temperatura ou com o tempo de carbonização. Além disso, nota-se que o atual trabalho apresentou valores maiores de materiais voláteis que é inversamente proporcional ao carbono fixo.

Santos (2008) sugere teor de carbono fixo, na faixa de 75% a 80%, para o uso siderúrgico, nos clones de Itamarandiba, apenas o 3 não apresentou valor médio dentro dessa faixa.

Maiores valores médios significativos foram observados, para o teor de cinzas, nos clones 6, 4 e 1, os quais não apresentaram diferença significativa entre si. O material genético 3 obteve o menor teor de cinzas, não apresentando diferença estatística para os clones 2, 5 e 7. A média geral do teor de cinzas foi de 1,19%, valor menor que o normalmente encontrado na literatura. Frederico (2009), para clone de *Eucalyptus* sp, aos três anos de idade, obteve 1,26% de cinzas. Protásio et al. (2014), para *Eucalyptus* spp. aos 3,8 anos, verificaram valor médio de 1,35% do teor de cinzas e, também, Soares (2011) com *E. urophylla* x *E. grandis*, aos três anos, que apresentou 1,53% de cinzas empregando a mesma marcha de carbonização do presente estudo.

Os materiais genéticos do presente estudo e os da literatura apresentaram valores médios acima de 1% que, segundo Santos (2008), seria indesejável para o uso siderúrgico.

Pela Tabela 19 observa-se que o maior valor médio de materiais voláteis do carvão dos materiais genéticos procedentes de Dionísio foi encontrado no material genético 12 (26,93%) e o menor valor ocorreu no clone 8 (22,68%).

Os valores de matérias voláteis do carvão originado de *Eucalyptus*, analisados por Rocha (2011), com tempo total de carbonização da madeira de sete horas e taxa de aquecimento média de $1,07^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, e Pereira (2012), utilizando taxa de aquecimento média de $1,67^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e temperatura final de 450°C , permanecendo estabilizada, por um período de 60 minutos, variaram de 24,23% a 26,72% em idades próximas aos sete anos. Valores semelhantes foram

obtidos por Couto (2014), com teores médios de 26,63% de materiais voláteis no carvão vegetal de *C. citriodora*, aos sete anos de idade. Porém, Trugilho et al. (2001), empregando marcha de carbonização similar ao atual estudo e Santos (2010), com tempo total de carbonização de sete horas e taxa de aquecimento média de $1,07^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ para *Eucalyptus* e Zanúncio (2013), para *C. citriodora*, obtiveram teores de materiais voláteis entre 11,74% e 20,76%.

Os resultados apresentados em Dionísio estão de acordo com o relatado por Santos (2008), em relação ao teor de materiais voláteis, exceto para o clone 12 que apresentou valor incompatível para o uso na siderurgia.

O cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* obteve uma maior amplitude de um local para outro (22,99% em Itamarandiba e 25,46% em Dionísio), porém a diferença entre os dois cruzamentos foi baixa, já que o *C. torelliana* x *C. citriodora* teve média de 24,22% e o *C. citriodora* x *C. torelliana* foi de 23,91%.

Maiores teores de materiais voláteis significam menores teores de carbono fixo, comprometendo a eficiência do carvão vegetal no alto-forno. É necessário que exista uma fração de voláteis no carvão vegetal uma vez que esses materiais promovem o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno e a diminuição da reatividade do carvão vegetal. Entretanto, para uso doméstico, um alto teor de voláteis ocasiona o desconforto da fumaça, além de menor eficiência energética, acarretando maior consumo de carvão vegetal (FREDERICO, 2009).

A variação do teor de carbono fixo para o carvão proveniente da madeira dos materiais plantados em Dionísio foi de 71,51% a 75,62% e média de 73,81%. Couto (2014), para clones de *C. citriodora*, aos sete anos, obteve 72,12% de carbono fixo. Porém, Zanúncio (2013) verificou no carvão do *C. citriodora* cerca de 78,53% de carbono fixo. Santos (2010) e Trugilho et al. (2001) encontraram valores entre 78,2% e 87,5% de carbono fixo, no carvão em madeira de eucalipto, em idades próximas ao material de Dionísio. Na literatura,

observaram -se, em geral, valores mais elevados de carbono fixo que os encontrados no presente estudo. Esse mesmo resultado ocorreu no material procedente de Itamarandiba.

Verifica-se que apenas o clone 8 do material localizado em Dionísio apresentou valor na faixa entre 75% e 80%, recomendado por Santos (2008), para o teor de carbono fixo para fins energéticos.

Observa-se que não houve influência do cruzamento, pois os valores foram bem semelhantes. O cruzamento *C. torelliana* x *C. citriodora* obteve uma maior diferença de um local para outro (75,77%, em Itamarandiba e 72,77%, em Dionísio), porém, entre os dois cruzamentos, relacionando os dois locais, a diferença foi pequena e o *C. torelliana* x *C. citriodora* teve média de 74,27% e o *C. citriodora* x *C. torelliana* foi de 74,77%.

O alto teor de carbono fixo no carvão vegetal aponta para o aumento do PCS em decorrência da maior presença de carbono, na estrutura da madeira, elevando a produtividade nos altos-fornos para o mesmo consumo do redutor. Apesar disso, altos teores de carbono fixo são inversos aos teores de materiais voláteis e estão associados ao aumento da reatividade do carvão, o que pode ocasionar prejuízos ao processo siderúrgico (FREDERICO, 2009).

Em relação ao teor de cinzas do material de Dionísio, o clone 11 diferiu, significativamente, dos outros e contém 2,12% de materiais inorgânicos, sendo o maior valor médio. A variação do teor de cinzas, nos clones procedentes de Dionísio, foi de 1,31% a 2,12%. Estes clones apresentaram valores médios acima de 1% e, segundo Santos (2008), indesejáveis para o uso siderúrgico.

Santos (2010) e Trugilho et al. (2001), para o gênero *Eucalyptus*, encontraram teores de cinzas entre 0,28% a 0,76%. Zanúncio (2013), para o *C. citriodora*, teve 0,72% de cinzas. O valor encontrado por Couto (2014) de 1,21%, para o *C. citriodora*, aproximou-se mais do resultado do material procedente de Dionísio.

No que se refere ao cruzamento, verificou-se que o *C. torelliana* x *C. citriodora* apresentou maior teor de cinzas no carvão nos dois locais estudados.

A presença de elevados teores de cinzas, no carvão vegetal, pode diminuir o seu poder calorífico; ocorre desgaste no alto-forno, conseqüentemente, pode alterar a qualidade do ferro-gusa, em virtude da segregação com formações de trincas e fissuras, além de apontar possível contaminação do carvão com resíduos do solo o que não é desejável.

5.3 Eficiência energética

A análise de variância, para a eficiência energética da carbonização, mostrou que o efeito de clone foi não significativo tanto nos materiais procedentes de Itamarandiba como de Dionísio. As Tabelas 20 e 21 apresentam os valores médios observados de eficiência energética para os clones plantados em Itamarandiba e Dionísio, respectivamente.

Tabela 20 - Valores médios da eficiência energética (EE) do carvão dos diferentes clones em Itamarandiba

Clones	Cruzamento	EE (%)
1	Cc x Ct	57,61 a
2	Cc x Ct	54,00 a
3	Cc x Ct	57,62 a
Média Cruzamento		56,41
4	Ct x Cc	55,13 a
5	Ct x Cc	55,80 a
6	Ct x Cc	56,40 a
7		56,04 a
Média Cruzamento		55,84
Média Geral		56,09
CVe (%)		3,95

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

Tabela 21 - Valores médios da eficiência energética (EE) do carvão dos diferentes clones em Dionísio

Clones	Cruzamento	EE (%)
8	Cc x Ct	53,05 A
9	Cc x Ct	52,63 A
10	Cc x Ct	53,25 A
Média Cruzamento		52,98
11	Ct x Cc	54,08 A
12	Ct x Cc	54,01 A
13	Ct x Cc	53,48 A
Média Cruzamento		53,86
Média Geral		53,42
CVe (%)		2,50

Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

CVe: coeficiente de variação experimental.

Cc x Ct = *C. citriodora* x *C. torelliana*; Ct x Cc = *C. torelliana* x *C. citriodora*.

No material procedente de Itamarandiba, os clones 1 e 3 apresentaram as maiores eficiências energéticas de 57,61% e 57,62%, respectivamente, enquanto o clone 2 a menor, de 54,00%. Os clones de Itamarandiba apresentaram maior variação de eficiência energética que os de Dionísio. A variação da eficiência energética dos clones, plantados em Itamarandiba, foi de 54,00% a 57,62%, enquanto, em Dionísio, foi de 52,63% a 54,08%. Para o material de Dionísio, o clone 9 (52,63%) apresentou eficiência mais baixa e o clone 11 (54,08%) obteve a mais alta eficiência energética.

Em relação aos cruzamentos de *Corymbia*, os valores médios foram próximos, nos dois locais estudados. Em Itamarandiba, o *C. citriodora* x *C. torelliana* com 56,41% e o *C. torelliana* x *C. citriodora* com 55,84%, enquanto, em Dionísio, o *C. citriodora* x *C. torelliana* com 52,98% e o *C. torelliana* x *C. citriodora* com 53,86%.

Verificou-se que o material de Itamarandiba apresentou média de eficiência energética mais alta (56,09%) do que Dionísio (53,42%). Analisando

as propriedades do carvão vegetal destes materiais, os clones de Dionísio apresentaram menores valores PCS da madeira e de RGC, podendo, assim, justificar esse valor inferior, além disso, possui maiores quantidades de cinzas e de materiais voláteis, conseqüentemente, menor teor de carbono fixo que não é desejável no processo de carbonização e afeta o poder calorífico.

É importante ressaltar que a eficiência energética da carbonização varia com a temperatura máxima de carbonização. De acordo com Nogueira e Lora (2003), a eficiência energética reduz com o aumento da temperatura até 700°C e estabiliza, aproximadamente, em 34% nas temperaturas mais elevadas.

5.4 Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal

A Tabela 22 apresenta os resultados, para correlações entre as propriedades da madeira e as propriedades do carvão, para os clones de Itamarandiba, Dionísio e para todos os clones, respectivamente.

Verifica-se, na Tabela 22, que houve correlação positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão para os clones de Itamarandiba e Dionísio. Essa mesma tendência se mantém quando se avaliam os clones em conjunto. Este resultado, também, foi observado por Brito e Barrichelo (1980), ao estudarem carvão vegetal de *Eucalyptus* sp., em diferentes idades; por Frederico (2009), que avaliou clones de *E. grandis* e de *E. urophylla* x *E. grandis*, aos três anos e por Santos (2010), que estudou clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos. Segundo Brito e Barrichelo (1980), essa correlação pode servir para orientar na escolha e no melhoramento de espécies para a produção de carvão vegetal.

Tabela 22 - Matriz de correlação de Pearson entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal.

Itamarandiba	RGC	RLP	RGNC	DRA	PCSc	CF	MV	CZc
DB	0,2550	-0,0805	-0,0302	0,8720	-0,1939	-0,3064	0,3249	-0,2555
TET	0,1978	-0,1842	0,1233	0,3731	-0,2379	-0,0770	0,0421	0,3102
TLT	0,1012	-0,0349	-0,0088	-0,1059	-0,0109	0,0201	-0,0092	-0,1042
HOLO	-0,2174	0,1915	-0,1223	-0,2662	0,2118	0,0391	-0,0111	-0,2532
PCSm	0,0524	0,0923	-0,1327	-0,2263	-0,2285	-0,3166	0,3110	-0,0325
Dionísio	RGC	RLP	RGNC	DRA	PCSc	CF	MV	CZc
DB	-0,0318	-0,4045	0,4068	0,7270	0,3169	-0,1083	0,0765	-0,1976
TET	0,3962	-0,4632	0,3359	0,3129	-0,2092	-0,2586	0,3233	0,4155
TLT	-0,0927	-0,0624	0,0890	-0,0789	0,0932	0,2092	-0,1581	0,3138
HOLO	-0,2347	0,3470	-0,2703	-0,1496	0,1205	0,0516	-0,1328	-0,5107
PCSm	-0,1514	-0,1536	0,1959	0,1730	0,2512	0,2272	-0,2410	-0,0865
Geral	RGC	RLP	RGNC	DRA	PCSc	CF	MV	CZc
DB	0,1652	-0,2255	0,1586	0,7698	0,0592	-0,2257	0,1721	-0,2375
TET	0,5741	-0,2053	-0,0719	0,4685	-0,1968	-0,3375	-0,0912	-0,0252
TLT	-0,2413	-0,0179	0,1423	-0,2343	0,0575	0,2342	0,0483	0,3274
HOLO	-0,4776	0,2258	0,0005	-0,3620	0,1838	0,2246	0,0834	0,0789
PCSm	0,1307	0,0068	-0,0744	-0,0117	-0,0744	-0,1995	0,0776	-0,1652

DB = densidade básica da madeira; TET = teor de extrativos totais; TLT = teor de lignina total; HOLO = teor de holocelulose; PCSm = poder calorífico superior da madeira; RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RLP = rendimento em líquido pirolenhoso; RGNC = rendimento em gases não condensáveis; DRA = densidade relativa aparente do carvão vegetal; PCSc = poder calorífico superior do carvão vegetal; CF = teor de carbono fixo do carvão; MV = teor de materiais voláteis do carvão vegetal; CZc = teor de cinzas do carvão vegetal.

Santos (2008) afirma que uma madeira tem maior ou menor densidade, fundamentalmente, em razão de quatro fatores: tamanho da fibra, espessura da parede celular, interação entre estes dois fatores e a presença de extrativos. No presente estudo foi observada correlação positiva entre o teor de extrativos com a densidade relativa aparente do carvão vegetal, nos três casos analisados, o que pode corroborar com o efeito positivo do teor de extrativos sobre a densidade básica da madeira.

Foi observada, também, correlação positiva, porém de baixa magnitude entre o teor de lignina na madeira e o de carbono fixo no carvão vegetal, nas três situações estudadas, corroborando com o encontrado por Brito e Barrichello (1977).

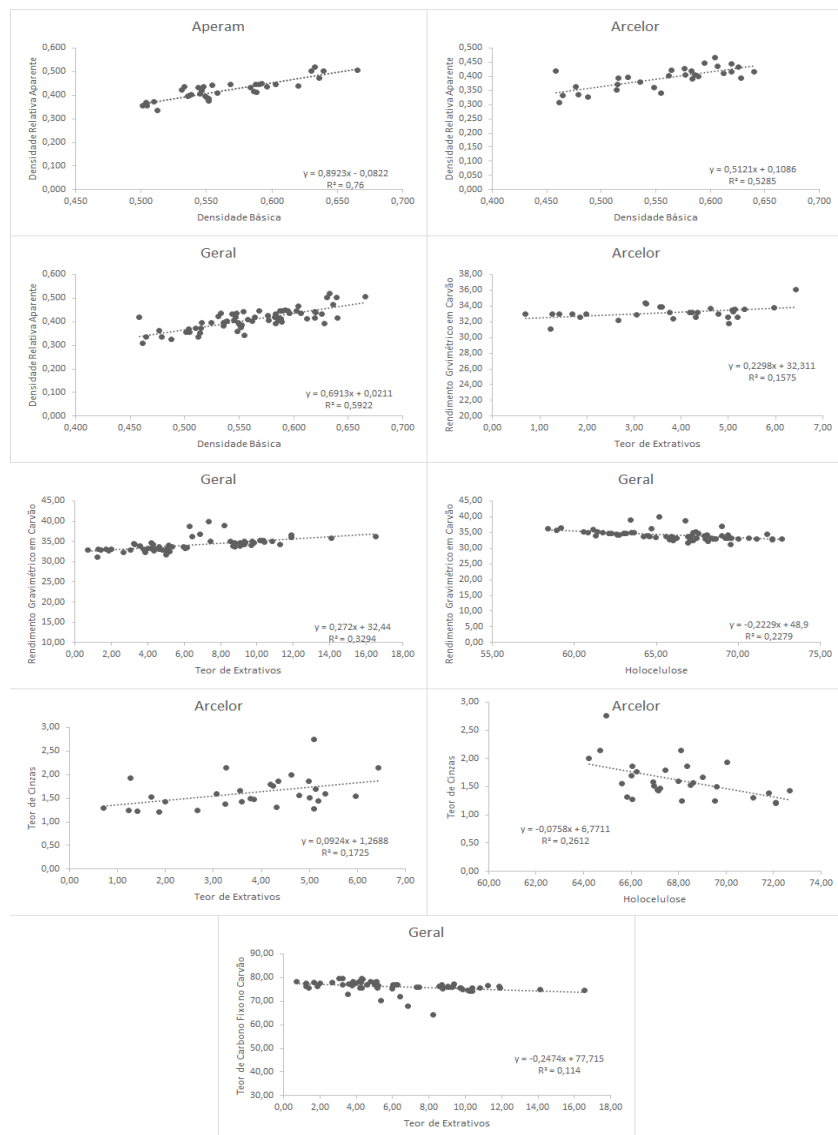
Quanto ao aumento do rendimento gravimétrico em carvão, as madeiras devem possuir, além de teor de lignina mais elevado, uma alta densidade básica, para aumentar a quantidade de matéria seca colocada no forno de carbonização. No entanto, essa a correlação entre o teor de lignina e o rendimento gravimétrico da carbonização foi positiva, porém de baixa magnitude, apenas no material procedente de Itamarandiba. Os extrativos totais apresentaram correlações positivas com rendimento em carvão vegetal, nas duas localidades analisadas e, também, no geral, inclusive, de maior magnitude.

Vital, Jesus e Valente (1994) relatam que os teores de holocelulose na madeira influenciam diretamente os rendimentos gravimétricos após a degradação térmica da madeira. No presente trabalho, foi observada correlação negativa entre o teor de holocelulose da madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, para o material nos dois locais e, no geral, correlação positiva com rendimento em líquido pirolenhoso.

Na Figura 4 são mostradas as relações funcionais mais significativas entre as características da madeira com as do carvão vegetal. Podem-se observar

tendências positivas e negativas nas duas localidades estudadas e na análise conjunta (geral).

Figura 4 - Relações funcionais entre algumas características da madeira com as do carvão vegetal, dos clones em Itamarandiba e Dionísio e no geral.



6 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) Os resultados mostram que existe variabilidade da madeira entre os materiais genéticos avaliados tanto em relação ao local quanto ao cruzamento, assim, não se deve utilizar apenas uma propriedade para classificação da madeira para produção de carvão vegetal porque vários fatores afetam o desempenho da madeira e do carvão vegetal.
- b) A madeira do material plantado em Itamarandiba apresentou efeito significativo de clone para a densidade básica, poder calorífico superior, teor de extrativos, teor de holocelulose e teor de cinzas, enquanto, para os clones procedentes de Dionísio, a densidade básica, os teores de hidrogênio, extrativos, holocelulose e cinzas apresentaram efeito significativo de clone.
- c) O efeito de clone foi não significativo para o teor de lignina nos dois locais estudados, além de não ter apresentado correlações significativas com as propriedades do carvão.
- d) As análises térmicas da madeira (TG/DTG) apresentaram variações expressivas entre os clones, nos dois locais analisados, sendo possível diferenciar duas etapas distintas de degradação (hemiceluloses e celulose).
- e) Na análise conjunta (geral) dos materiais genéticos, o teor de extrativos afetou, positivamente, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.
- f) Os dois locais apresentaram diferenças estatísticas entre os clones em relação ao carvão vegetal apenas nas propriedades de densidade relativa aparente e teor de cinzas.
- g) A diferença entre os locais, para o rendimento gravimétrico e eficiência energética, não foram significativas, entretanto o material de

Itamarandiba apresentou valores superiores ao de Dionísio nessas duas propriedades do carvão.

- h) Embora a maioria dos clones tenha apresentado propriedades satisfatórias, para produção de carvão vegetal para uso siderúrgico, o clone 3, plantado em Itamarandiba, obteve melhor desempenho quando se avaliaram o rendimento e a eficiência energética, assim, possui o maior potencial para a produção de carvão. Entretanto, o clone 9, cultivado em Dionísio, não seria o mais indicado, por apresentar a menor eficiência energética, rendimento gravimétrico e densidades.
- i) Para os clones plantados em Itamarandiba seria interessante fazer nova amostragem e avaliação, em idade comercial, para se confirmar as conclusões obtidas nesse material em idade ainda precoce.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.
- ASSIS, T. F. Production and use of *Eucalyptus* hybrids for industrial purposes. In: QFRI/CRC-SPF SYMPOSIUM, 2000, Noosa. **Proceedings...** Brisbane: Department of Primary Industries, 2000. p. 63-75.
- ASSIS, T. F. **Relatório de visitas à Arcelor Mittal Bioflorestas**. 17th ed. [S.l.]: Assistech, 2012. 15 f.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BOLAND, D. et al. **Forest trees of Australia**. Melbourne: CSIRO, 2006. 736 p.
- BOTREL, M. C. G. et al. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, maio/jun. 2007.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I., densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 2, densidade da madeira X densidade do carvão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, out. 1980.
- BROCCO, V. F. et al. Efeito do tempo e pressão de tratamento nas propriedades mecânicas das madeiras de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 777-787, 2012.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. namadeira e carvão vegetal.** 2011. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia.** 1996. 58 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

COUTO, A. M. **Influência das propriedades anatômicas, químicas e físicas da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade do carvão para uso siderúrgico.** 2014. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

DI BLASI, C. D. Comparison of semi-global mechanisms for primary pyrolysis of lignocellulosic fuels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 47, n. 1, p. 43-64, Sept. 1998.

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

DOAT, J.; PETROFF, G. La carbonization des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 159, p. 55-72, jan./fév. 1975.

ELEOTÉRIO, J. R. et al. Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivados no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2015.

FONSECA, S. M. da et al. **Manual prático de melhoramento genético do eucalipto.** Viçosa, MG: UFV, 2010. 200 p.

FREDERICO, P. G. U. **Influência da densidade e composição química da madeirasobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridosde *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.** 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Ed.). **Lignins.** New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts 7: a revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**, Sydney, v. 6, p. 185-504, 1995.

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

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores**: ano base 2014. Brasília: IBA, 2015. 97 p.

LE VAN, S. L. Thermal degradation. In: SCHNIEWIN, D.; ARNO, P. (Ed.). **Concise encyclopedia of wood & wood-based materials**. Oxford: Pergamon, 1992. p. 271-273.

LEE, D. J. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand: 2., development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. **Australian Forestry Journal**, Melbourne, v. 70, n. 1, p. 11-16, 2007.

MATOS, J. R.; MERCURI, L.; BARROS, G. Análise térmica aplicada a fármacos e medicamentos. In: STORPIRTIS, S. et al. (Ed.). **Biofarmacotécnica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009. v. 1, p. 32-48.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass: part 1, overview of biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, n. 1, p. 37-46, May 2002a.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass: part 2, conversion technologies. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, n. 1, p. 47-54, May 2002b.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. São Paulo: Artliber, 2002. 300 p.

MULLER, M. D. **Produção de madeira parageração de energia elétrica numa plantaçooclona de eucalipto em Itamarandiba, MG**. 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

OLIVEIRA, J. B. de; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Carbonização da madeira, modelo físico e influência das variáveis de processo. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, São Paulo, v. 40, n. 319, p. 315-319, jun. 1984.

OLIVEIRA, J. B. de; 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, 1982. p. 62-73.

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

PEREIRA, B. C. S. **Propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. em função da idade de corte**. 2011. 40 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

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

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

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização e carvão vegetal**. Viçosa, MG: Centro de Produções Técnicas, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P. C. C. et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 120 p.

POLETTO, M. et al. Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, Essex, v. 109, p. 148-153, Apr. 2012.

PROTÁSIO, T. P. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, abr./jun. 2014.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011.

QUINHONES, R. **Relações entre as características da madeira de *Eucalyptus* sp. e as do carvão produzido a diferentes temperaturas finais de carbonização.** 2011. 78 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista Madeira**, Curitiba, n. 89, p. 100-106, 2005.

RAAD, T. J. **Drying process simulation and *Eucalyptus* sp carbonization.** 2004. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, abr./jun. 2006.

REIS, C. A. F. et al. ***Corymbia torelliana*: estado da arte de pesquisas no Brasil.** Colombo: EMBRAPA Florestas, 2014. 48 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 261).

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia.** 2011. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: _____. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Boca Raton: CRC, 2005. p. 121-138.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com enfoque energético.** 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008. 1 CD-ROM.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SILVA, M. G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.

SILVA JÚNIOR, M. C.; SCARANO, F. R.; CARDEL, F. S. Regeneration of Atlantic forest formation in understorey of a *Eucalyptus grandis* plantation in south-eastern Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 11, p. 147-152, 1995.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. 2011. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e da idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 16, p. 55-59, 1988.

TAKARADA, L. M. **Efeito da morfologia das fibras das madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* na produção e qualidade do carvão vegetal**. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI test methods T204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, 2001. 1 CD-ROM.

TRUGILHO, P. F. et al. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, mar./abr. 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

TRUGILHO, P. F. et al. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 4, p. 661-666. Abr. 2015.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M. de; VALENTE, O. F. Características de crescimento de árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 47, p. 22-28, set. 1994.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, n. 12/13, p. 1781-1788, Jan. 2007.

ZANUNCIO, A. J. V. **Influência da secagem da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* na produção e qualidade do carvão**. 2013. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.