



ANTÔNIO JOSÉ VINHA ZANUNCIO

**INFLUÊNCIA DA SECAGEM DA MADEIRA DE
Eucalyptus E *Corymbia* NA PRODUÇÃO E
QUALIDADE DO CARVÃO**

LAVRAS-MG

2013

ANTÔNIO JOSÉ VINHA ZANUNCIO

**INFLUÊNCIA DA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus* E *Corymbia*
NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO**

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

Orientador

Dr. José Tarcísio Lima

LAVRAS-MG

2013

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

Zanuncio, Antônio José Vinha.

Influência da secagem da madeira de *Euclayptus* e *Corymbia* na
produção e qualidade do carvão / Antônio José Vinha Zanuncio. –
Lavras : UFLA, 2013.

69 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: José Tarcísio Lima.

Bibliografia.

1. Umidade. 2. Energia. 3. Poder calorífico. 4. Biomassa. 5.
Rendimento gravimétrico. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 674.38

ANTÔNIO JOSÉ VINHA ZANUNCIO

**INFLUÊNCIA DA SECAGEM DA MADEIRA DE *Eucalyptus* E *Corymbia*
NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO CARVÃO**

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

APROVADA em 20 de Fevereiro de 2013.

Dr. José Tarcísio Lima	UFLA
Dr. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Dra. Hélder Bolognani Andrade	V&M Florestal Ltda

Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

LAVRAS – MG

2013

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo;

A meu pai, José e minha mãe, Teresinha, pelo amor e carinho que sempre me ajudaram durante toda minha vida;

As minhas irmãs; Virgínia e Andressa, sempre presentes na minha vida;

Aos meus sobrinhos; Cecília e Eduardo, pelas alegrias que sempre me proporcionam ao vê-los;

A minha namorada, Amélia, por sempre estar ao meu lado me ajudando e incentivando;

Aos meus amigos da Ciência e Tecnologia da Madeira, pelo apoio e companheirismo ao longo destes dois anos;

Aos companheiros da república Dr. Cana; Paulo, Thiago e Zinho, pela amizade;

Ao Carlos, pela imensa disponibilidade em sempre me ajudar na serraria;

Aos professores; José Tarcísio Lima; Paulo Fernando Trugilho e José Reinaldo Moreira da Silva, pela orientação;

À Capes, VM florestal e Ufla, pela concessão de bolsa de estudos e fornecimento do material de trabalho.

RESUMO

Para que o carvão vegetal seja produzido com qualidade e quantidade adequadas, é preciso que a madeira apresente baixa umidade, entretanto, secar a madeira ainda é um obstáculo para um melhor aproveitamento energético do material lenhoso. O objetivo deste trabalho foi estudar a secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* e o efeito da umidade na carbonização desses materiais. Toras com um metro foram retiradas da base, do meio e do topo dos troncos dessas plantas para avaliação da secagem. As toras foram acondicionadas em local coberto, ao ar livre, e a umidade avaliada por 90 dias. Uma tora, com um metro, foi retirada logo acima da tora da base para estudo da carbonização. As madeiras foram carbonizadas após um, dois e três meses de estocagem com taxa de aquecimento de 1,67 °C/min, temperatura máxima de 450 °C e tempo de residência de 30 minutos. O poder calorífico da madeira, rendimento gravimétrico em base seca e úmida; análise química imediata e poder calorífico do carvão foram avaliados. Após 90 dias de secagem, as toras de *Corymbia citriodora* apresentaram as menores umidades, 31,13; 20,29 e 17,07% para as regiões da base, meio e topo, respectivamente, o clone Vm 4 (*Eucalyptus urophylla*) com 40,47; 21,33 e 15,96% de umidade para as regiões da base, meio e topo e de Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) com 61,28; 33,15; 15,98% para base, meio e topo. Entre todas as toras avaliadas, apenas os caules da base do Vm 4 (*Eucalyptus urophylla*) e Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*), apresentaram umidade média inferior a 35%, próximo do PSF. Após 90 dias de secagem, houve incremento de 960; 1141 e 1209 cal/g para madeira do Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*); Vm 4 (*Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora* respectivamente. Houve incremento no rendimento gravimétrico na base úmida para os três materiais.

Palavras-chave: Umidade. Energia. Poder calorífico.

ABSTRACT

For the production of high quality charcoal it is necessary that the wood presents low moisture content. However, there are some barriers to dry round wood in natural conditions for a better energetic use. The objective of this work was to study both *Eucalyptus* and *Corymbia* logs drying at natural conditions, assessing the effect of the moisture content on the carbonization of these materials. For this, one meter long logs were cut at the base, in the middle and in the top of the stems. The logs were air seasoned for 90 days in a shed. During this period the moisture content was measured. One 1-meter long log was cut, just above of the basal log for carbonization study. Samples of wood were carbonized after one, two and three months of drying, following heating rate of 1.67 °C/min, maximum temperature of 450 °C and 30 minutes of residence time. The calorific value of the wood, gravimetric yield both in dry and moist bases; immediate chemical analyses and calorific value of the charcoal pieces were assessed. After 90 days of drying, the *Corymbia citriodora* logs presented the lowest moisture contents – 31.13; 20.29 and 17.07% for the base, middle and top regions, respectively; clone VM4 (*Eucalyptus urophylla*) with 40.47; 21.33 and 15.96% of moisture content for base, middle and top regions presented intermediate values of moisture content, while clone MN463 (*E. urophylla*) with 61.28%; 33.5% and 15.98% for base, middle and top regions presented highest moisture contents. Amongst all assessed logs, only the basal logs of clone VM4 and MN463 presented average moisture content lower than 35%, near the fsp. After 90 days of drying, it was observed an increment of 960; 1141 and 1209 cal/g for the woods of clone MN463 and VM4, and for *Corymbia citriodora*, respectively. Also, it was observed an increment in the gravimetric yield, based in moist wood, for the three genetic materials.

Keywords: Moisture. Energy. Calorific value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Retirada de discos para determinação da umidade da madeira; U: cunhas destinadas para determinação da umidade	33
Figura 2	Retirada de discos para determinação da umidade da madeira e para carbonização; U: cunhas destinadas para determinação da umidade; C: cunhas destinadas a carbonização.....	35
Figura 3	Relação entre a umidade inicial e a densidade básica e entre máximo teor de umidade (MTU) e umidade inicial das toras da base de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i>	40
Figura 4	Relação entre a densidade básica e taxa de secagem em 90 dias e com a umidade final das toras de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i> da base .	41
Figura 5	Curva de secagem de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i> em função do tempo de secagem	44
Figura 6	Relação entre umidade real e umidade observada para toras do clone Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>).....	47
Figura 7	Distribuição dos resíduos para as toras do clone Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>).....	49
Figura 8	Relação entre umidade real e umidade observada para toras do clone VM 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>).....	51
Figura 9	Distribuição dos resíduos para as toras do clone Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>).....	53
Figura 10	Relação entre umidade estimada e umidade observada para toras de <i>Corymbia citriodora</i>	55
Figura 11	Distribuição dos resíduos para as toras de <i>Corymbia citriodora</i>	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Perda de umidade em toras de um clone de <i>E. urophylla</i> em Paraopeba, Minas Gerais	20
Tabela 2	Composição elementar da madeira de Carvalho branco (<i>Quercus alba</i>) e carvão mineral	21
Tabela 3	Produtos da pirólise, obtidos por meio da carbonização da madeira 500 °C	23
Tabela 4	Rendimento da carbonização em mufla a 450 °C e 5 bars com madeira de diferentes umidade.....	24
Tabela 5	Rendimento em licor pirolenhoso (%) da madeira de <i>Mimosa scabrella</i> Bentham carbonizada em diferentes temperaturas.....	24
Tabela 6	Densidade do carvão em função da umidade da madeira carbonizada sob diferentes pressões.....	25
Tabela 7	Finos gerados de carvão vegetal, em função da umidade.....	26
Tabela 8	Composição elementar da madeira submetida a tratamento térmico em diferentes temperaturas.....	27
Tabela 9	Influência da umidade da madeira na composição química imediata do carvão	28
Tabela 10	Influência da umidade no poder calorífico em toras de <i>Eucalyptus</i>	30
Tabela 11	Diâmetro médio das toras e altura comercial média das árvores de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i> avaliadas.....	31
Tabela 12	Testes de carbonização.....	36
Tabela 13	Umidade inicial, densidade e máximo teor de umidade médio das toras de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i>	39

Tabela 14 Taxa de secagem das toras em diferentes períodos e umidade final após 90 dias de secagem.....	43
Tabela 15 Equações ajustadas para umidade das toras do clone Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>) em função dos dias de secagem	45
Tabela 16 Equações ajustadas para umidade das toras do clone VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>) em função dos dias de secagem	50
Tabela 17 Equações ajustadas para umidade das toras do clone de <i>Corymbia citriodora</i> em função dos dias de secagem.....	54
Tabela 18 Umidade das toras destinadas à carbonização nos diferentes períodos avaliados	57
Tabela 19 Poder calorífico superior e líquido da madeira do clone Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>); VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>) e <i>Corymbia citriodora</i>	58
Tabela 20 Rendimento gravimétrico na produção do carvão após secagem e na condição anidra.....	59
Tabela 21 Densidade do carvão após secagem e na condição anidra.....	60
Tabela 22 Análise imediata e poder calorífico superior do carvão produzido após secagem e na condição anidra.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	O gênero <i>Eucalyptus</i>	13
2.2	Água na madeira	13
2.3	Movimentação de água na madeira	15
2.4	Movimentação da água livre	15
2.5	Movimentação da água de adsorção	16
2.6	Fatores que afetam a secagem	17
2.6.1	Fatores inerentes à madeira	17
2.6.2	Fatores externos à secagem	18
2.7	Secagem da madeira para carbonização	19
2.8	Carbonização	20
2.9	Produtos da carbonização	22
2.10	Rendimentos do processo de carbonização	23
2.11	Propriedades físicas do carvão	24
2.12	Propriedades químicas do carvão	26
2.13	Poder calorífico	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Material de estudo	31
3.2	Densidade básica	32
3.3	Máximo teor de umidade	32
3.4	Secagem do material	33
3.5	Poder calorífico da madeira	34
3.6	Carbonização da madeira	34
3.7	Análise dos resultados	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Secagem da madeira	38
4.2	Propriedades energéticas da madeira e do carvão	57
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O mundo busca fontes de energia para substituir o consumo de combustíveis fósseis. Neste contexto, a madeira surge com destaque. Dentre os produtos derivados da madeira, o carvão vegetal apresenta posição importante na geração de energia, principalmente devido ao caráter renovável dessa matéria-prima.

A produção de carvão vegetal depende tanto do processo como da madeira utilizada. Fatores como a temperatura, taxa de aquecimento, fluxo gasoso e pressão estão sob a influência do sistema e devem ser convenientemente controlados. Com relação à madeira, as características químicas, físicas e anatômicas afetam a produção e qualidade do carvão vegetal.

A umidade da madeira deve ser observada no processo de carbonização. Dentro do forno, antes de ser carbonizada, a madeira sofre secagem, o que demanda energia, fornecida pela queima da própria madeira. Como consequência, a presença da água na madeira afeta negativamente a produção de carvão vegetal, expressa pelo rendimento gravimétrico (KLITZKE, 1998).

No Brasil, a secagem da madeira ao ar livre é o método mais empregado devido ao seu baixo custo. Tecnicamente, o ideal seria a utilização da madeira na umidade de equilíbrio, entretanto abaixo do ponto de saturação das fibras, a perda de umidade é muito lenta, inviabilizando parte do processo, desse modo, os produtores de carvão visam à obtenção de toras com umidade em torno de 35%.

O tempo de secagem varia entre 90 e 150 dias, tempo insuficiente para carbonização da madeira com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras. Empresas do setor de carbonização de *eucalyptus* instaladas em minas gerais informam que após cerca de 150 dias de secagem, as toras ainda apresentam umidades entre 35% e 45%. deve-se ainda considerar que raramente é avaliada a

variação de umidade dentro da tora, principalmente no sentido radial. é conhecido que no centro das toras a umidade ainda é alta, chegando a valores de 60% ou mais.

Os estudos de secagem da madeira abordam principalmente a secagem da madeira serrada, trabalhos com secagem da madeira roliça como os de Rezende et al. (2010a) e Rezende et al. (2010b) são escassos. Os estudos que avaliam a umidade na carbonização utilizam material com umidade homogênea em todo o corpo de prova (KLITZKE, 1998; ROUSSET et al., 2011), o que não corresponde a situação de campo, onde a umidade possui uma distribuição heterogênea ao longo da tora (OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da umidade na qualidade e quantidade de carvão vegetal produzidos de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O gênero *Eucalyptus*

O *Eucalyptus* é um dos gêneros florestais mais cultivados no mundo. No Brasil, para aumentar a produtividade dos povoamentos florestais, o melhoramento genético é utilizado para selecionar clones que melhor se adaptem as condições de campo. Tais clones podem ser de uma mesma espécie ou mesclando diferentes espécies de *Eucalyptus*. Cada clone possui características diferenciadas quanto às exigências edafoclimáticas e sua madeira apresenta características variadas quanto à utilização (BOTREL et al., 2010; PEREIRA et al., 2000).

Espécies do gênero *Eucalyptus* são plantadas em extensas áreas para a produção de madeira para diversos fins. O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2010). Além de ocupar o quarto lugar na produção mundial de celulose e o décimo na produção de papel (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA, 2012). As condições climáticas, rápido crescimento, tecnologia de produção, desenvolvimento de práticas silviculturais eficientes, melhoramento genético e técnicas que permitem um melhor aproveitamento da madeira são os principais fatores que garantem a competitividade dessa matéria prima.

2.2 Água na madeira

A madeira apresenta caráter higroscópico. A água em seu interior se divide em água livre ou de capilaridade, água de adsorção e água de constituição (SIAU, 1971).

A água livre ou de capilaridade ocupa o lume das células ou espaços vazios, é retida por fracas ligações intermoleculares (SKAAR, 1972). Ocorre quando a umidade da madeira se encontra entre o ponto de saturação das fibras e o máximo teor de umidade (SKAAR, 1972).

Quando toda a água livre é removida e todos os sítios de ligação covalente da parede celular estão ocupados, a madeira se encontra no ponto de saturação das fibras (PSF). Esse ponto varia de espécie pra espécie, mas situa-se entre 20 e 35% de umidade (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

A água de adsorção está contida na parede celular, sendo retida por ligações de hidrogênio nas estruturas das polioses e celulose na forma de grupos hidroxílicos, mas parte da água adsorvida a essas moléculas se conecta por valência secundária (SKAAR, 1972). A retirada da água de adesão causa perda de volume, pois os grupos hidroxílicos da celulose e polioses se ligam entre si, causando a retração da madeira. Este efeito pode causar defeitos na madeira, como empenamentos e rachaduras, podendo inviabilizar seu uso (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

A água de constituição faz parte da estrutura do lenho, só podendo ser removida com a degradação da madeira (SIAU, 1971).

A umidade na madeira varia conforme as condições ambientais, como temperatura e umidade relativa, em que se encontra a peça. Tornando estas condições constantes, a umidade da madeira se estabiliza. Este fenômeno chama-se umidade de equilíbrio e varia entre as espécies (SIAU, 1971). Baraúna e Oliveira (2009) encontraram umidade entre 8,4 e 15,13% para amostras de *Dinizia excelsa*; 7,7 a 14,09% para *Clarisia racemosa* e entre 8,4 e 16,53% para *Cariniana micrantha* quando submetidas a temperaturas entre 25 e 35 °C e umidade entre 40 e 80%.

2.3 Movimentação de água na madeira

A água na madeira se movimenta em função de um gradiente de umidade. Movimento que ocorre em todos os sentidos no caule, contudo o movimento no sentido longitudinal é mais rápido que no transversal e o radial é mais rápido que no sentido tangencial (SIAU, 1971).

Em toras de madeira, a superfície rolante é muito superior à superfície topo, fazendo com que a água se movimente em maior parte no sentido transversal, devido ao menor caminho a ser percorrido. Outros fatores também influenciam na movimentação da água, devido à presença de extrativos no cerne, a movimentação da água é mais rápida no alburno. Madeiras com maior densidade em geral apresentam menos poros e maior espessura da parede celular, desse modo a movimentação da água ocorre de forma mais lenta (SIAU, 1971).

2.4 Movimentação da água livre

A movimentação da água livre ocorre quando a madeira se encontra com umidade acima do ponto de saturação das fibras. A água se move por tensão de capilaridade no sentido longitudinal baseado na lei de Hagen-Poiseuille (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Dentro de um capilar, a movimentação da água livre ocorre pela diferença nas forças de tensão no interior do capilar (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

A tensão no menisco pode ser determinada pela equação 1:

$$TC = h \times \rho = 2\sigma/r \quad (1)$$

Onde:

TC: tensão capilar (g/cm^2)

h: altura em que o líquido sobe no capilar (cm)

ρ : densidade do líquido (g/cm^3)

σ : tensão superficial do líquido (g/cm^2)

r: raio do capilar (cm)

2.5 Movimentação da água de adsorção

No processo de movimentação da água de adsorção, a água trasloca na forma de vapor nas pontoações e cavidades celulares devido ao gradiente de pressão de vapor (umidade relativa). A madeira é um material heterogêneo, desse modo, deve-se aplicar a segunda Lei de Fick, que representa a velocidade de alteração da concentração de uma determinada substância em função do tempo e o deslocamento (SIAU, 1971) (Equação 2).

$$\frac{dm}{dt} = Dg \frac{(d^2 M)}{dx^2} \quad (2)$$

$\frac{dm}{dt}$ = Quantidade de água removida (m) por unidade de tempo (t)

Dg = Coeficiente de difusão médio (cm^2/s)

$\frac{(d^2 M)}{dx^2}$ = Variação da umidade na distância (x)

2.6 Fatores que afetam a secagem

A velocidade de secagem depende de características do ambiente e da madeira. Como aspectos característicos à madeira têm-se a sua composição anatômica e dimensões e entre os fatores característicos ao ambiente podemos citar a temperatura, umidade e velocidade do ar.

2.6.1 Fatores inerentes à madeira

A razão cerne e alburno do material lenhoso influencia a velocidade de secagem da madeira. O cerne apresenta alto teor de extrativos e tiloses, o que o torna menos permeável, tornando lenta a secagem de madeiras com alta proporção de cerne (SIAU, 1971).

Os pontos de descontinuidade da parede secundária deixados entre células adjacentes, denominados pontoações, auxiliam na translocação radial da água no caule. O tipo, o diâmetro o fato de estarem aspiradas ou não e o número de pontoações existentes na madeira podem tornar um processo de secagem mais lento ou mais rápido (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Os traqueídeos nas coníferas e os vasos na folhosas são responsáveis pela condução de seiva bruta na caule, um alto volume desses constituintes fazem com que a secagem da madeira seja mais rápida (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

As fibras, células especializadas na sustentação e que ocupam grande parte do material lenhoso possuem espessa parede celular e pontoações pequenas ou até ausentes, com isso uma alta concentração de fibras acarreta na diminuição da taxa de secagem (SIAU, 1971).

Fatores físicos da madeira também afetam a secagem. A casca, que contém muita suberina, afeta negativamente na saída de água (REZENDE et al.,

2010a; REZENDE et al., 2010b). Quanto maior a densidade, menor será o volume de espaços vazios na madeira, reduzindo a taxa de secagem (BERBEROVIC; MILOTA, 2011). Em toras de maior diâmetro, o caminho a ser percorrido pela água é maior, tornando a secagem mais lenta (REZENDE et al., 2010a).

2.6.2 Fatores externos à secagem

A velocidade do ar é mais efetiva sobre a taxa de secagem quando a madeira possui elevada umidade (KOLLMANN; SCHNEIDER, 1960, citados por BARROS, 2006). Em razão disso, o início do processo possui taxas de secagem maiores, porém a partir do momento em que a água superficial é evaporada da madeira, a taxa torna-se decrescente (KOLLMANN; SCHNEIDER, 1960, citados por Barros, 2006). Na secagem convencional de *Liriodendron tulipifera* L., Steinhagen (1974 citado por SANTINI; HASELEIN, 2002) constatou que durante o processo de secagem a velocidade do ar atua de forma significativa até 40% de umidade. Abaixo desse ponto, recomendou o uso de velocidades inferiores a 1,25 m/s até o final da secagem, devido a razões econômicas.

A umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver sob mesma temperatura (ponto de saturação). A redução na umidade relativa do ar resulta em um aumento da velocidade de secagem, visto que o ar suportará mais água na forma de vapor o que acelerará o processo (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Em altas temperaturas, a secagem ocorre de forma mais rápida devido ao aumento do calor fornecido à madeira, aumentando a agitação das moléculas de água e a velocidade de movimentação das mesmas, além de diminuir a umidade relativa do ar (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

2.7 Secagem da madeira para carbonização

A madeira apresenta consideráveis quantidades de água. Após a derrubada das árvores o teor de umidade da madeira é alterado até que ela entre em equilíbrio com a atmosfera que a envolve (WENGERT, 2005).

A secagem reduz o custo de transporte, uma vez que a madeira úmida possui grandes quantidades de água que são transportadas (HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005). A madeira com maior umidade apresenta propriedades mecânicas inferiores à madeira anidra (HASELEIN et al., 2002). No processo de carbonização, a madeira com alta umidade diminui o rendimento gravimétrico e aumenta a produção de finos (KLITZKE, 1998).

Para o processo de perda de umidade, é necessário o fornecimento de calor, com isso ocorre a evaporação da água próxima da superfície. A partir daí cria-se um gradiente de umidade, em que a água se movimenta das áreas de alta concentração para as de baixa concentração (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

A secagem ao ar livre é o método mais empregado de secagem para a produção de carvão vegetal. Devido às condições climáticas, este tipo de secagem tem grande potencial no Brasil. Como vantagem tem-se o baixo investimento e como desvantagem o longo tempo de secagem em relação à secagem artificial (ROSSO, 2006).

Toras de *Eucalyptus grandis* com 11 anos de idade secas ao ar livre, com comprimento de 2,30 m e sem casca, em Santa Maria, RS, apresentaram umidade média de 70% após 30 dias de exposição às condições ambientais, partindo de uma umidade inicial de 106%; após 60 dias de secagem, a umidade média aproximou-se de 40%, tendendo, a partir daí, a taxas de secagem constantes (BARROS, 2006).

Em toras com oito anos de idade dos clones de *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* (VM01) e de *Eucalyptus urophylla* (MN463), toras com casca

apresentaram perda de umidade de 75% com base na massa seca, após 80 dias, enquanto toras sem casca perderam 80% de umidade no mesmo período (Rezende et al., 2010a). Toras sem casca entre 11 e 17 cm perderam 56 % de umidade após 80 dias, enquanto toras entre 6 e 11 cm apresentaram perda de umidade de 75% para o mesmo período. A umidade final entre as toras foi semelhante para as duas classes diamétricas, entretanto, as toras possuíam umidade inicial diferentes, o que deixa dúvidas à respeito da influencia da casca na taxa umidade final da madeira após um período de 80 dias (REZENDE et al., 2010a; REZENDE et al., 2010b) (Tabela 1).

Tabela 1 Perda de umidade em toras de um clone de *E. urophylla* em Paraopeba, Minas Gerais

Tora	Classe diamétrica (cm)	Tempo de secagem (dias)				Umidade final (%)
		7	14	21	80	
Com casca	14 – 20	13	11	8	65	
	9 – 14	21	15	11	80	43
Sem casca	11 - 17	9	7	6	56	63
	6 -11	15	12	9	75	42

Fonte: Rezende et al. (2010 b)

2.8 Carbonização

A carbonização da madeira consiste na decomposição térmica da mesma, na ausência ou na presença controlada de O₂ (ar), deixando como principal produto o carvão vegetal. É um exemplo típico de combustão incompleta e muitos fenômenos físico-químicos e reações complexas ocorrem durante o processo (WENZL, 1970).

Esse processo gera compostos voláteis, gases não condensáveis e carvão vegetal. Recebe os nomes de carbonização, decomposição térmica, pirólise ou destilação (BRIANNE; DOAT, 1985). Como o processo é físico-químico, as alterações físicas mais comuns são mudança de cor, redução de volume, aumento da porosidade, diminuição da densidade aparente e resistência mecânica (REZENDE, 1983).

Combustíveis fósseis possuem quase que exclusivamente carbono, hidrogênio e cinzas, enquanto a madeira possui elevados teores de oxigênio, devido principalmente à celulose e hemicelulose, estes polímeros são degradados nas faixas de temperatura utilizadas na carbonização, desse modo estes constituintes reduzem o rendimento gravimétrico e o poder calorífico (SWITHENBANK et al., 2011) (Tabela 2).

Tabela 2 Composição elementar da madeira de Carvalho branco (*Quercus alba*) e carvão mineral

Elemento Químico (%)	Madeira de <i>Quercus alba</i>	Carvão mineral
Carbono	50.2	84.2
Hidrogênio	5.5	5.6
Oxigênio	43.8	5.5
Nitrogênio	1.3	0.4
Enxofre	-	3.5

Fonte: Swithenbank et al. (2011)

A análise térmica da madeira mostra um comportamento endotérmico da pirólise da biomassa em temperatura de até 230 °C. Após este limite as reações passam a ser predominantemente exotérmicas. A maior produção de hidrocarbonetos, principalmente metano, ocorre em temperaturas superiores a 300 °C, nas quais ocorrem os maiores picos de degradação térmica (SANTOS et al., 2012; STREZOV et al., 2007).

A carbonização é influenciada pelas variáveis do processo. Rousset et al. (2011) avaliaram a influencia da pressão, entre 0,5 e 10 bar, da temperatura, entre 450 e 600 °C e da umidade no processo de carbonização da madeira de *Eucalyptus grandis*. Os resultados mostraram que as condições de 600 °C, pressão de 10 bars e anidra produziram carvão com maior teor de carbono fixo e poder calorífico.

A umidade da biomassa florestal, para uso energético, deve ser igual ou inferior a 35%. Portanto, as operações aplicadas ao material destinado à geração de energia devem objetivar percentuais nesta faixa (BRAND et al., 2011).

2.9 Produtos da carbonização

Durante a carbonização do material lenhoso, o carvão vegetal é o principal produto. Entretanto, utilizando processos que realizam a condensação dos gases emitidos durante o processo é possível obter outros produtos, como o licor pirolenhoso (ALMEIDA; REZENDE, 1982). Ainda segundo mesmos autores, existem os gases não condensáveis, como CO, CO₂, N₂, CH₄, H₂, que são liberados para a atmosfera.

O licor pirolenhoso contém ácido pirolenhoso, solução aquosa de ácidos acético e fórmico, metanol e alcatrão solúvel e constituintes em menores proporções. O alcatrão consiste na fração negra, insolúvel, oleosa e pesada do condensado, sua composição é rica em condensados fenólicos (OLIVEIRA, 1988). A matéria volátil não condensável consiste de compostos gasosos de carbono (CO₂, CO, CH₄) e nitrogênio (PINHEIRO et al., 2001).

Pela carbonização da madeira em laboratório a 500 °C, são obtidos vários produtos, normalmente encontrados em qualquer tipo de madeira em diferentes proporções, seja em região temperada ou tropical (BRIANNE; DOAT, 1985) (Tabela 3).

Tabela 3 Produtos da pirólise, obtidos por meio da carbonização da madeira 500 °C

Produtos da pirólise Madeira seca ao ar (20% de umidade)	Rendimento (%)
Carvão vegetal	31,0
Água	28,0
Ácido acetic	6,0
Metanol	2,5
Outros não aromáticos	3,5
Furfural	1,0
Alcatrão	6,0
Derivados fenólicos	3,0
Gases não condensáveis	19,0
Total	100,0

Fonte: Brianne e Doat (1985)

*Guide Technique de la Carbonisation

2.10 Rendimentos do processo de carbonização

O rendimento gravimétrico em carvão é definido como a razão entre a massa de carvão no término do processo e a massa de madeira no início do processo.

Segundo Oliveira (1988), o rendimento gravimétrico possui correlação positiva com o teor de ligninas e extrativos, mas possui correlação negativa com a largura dos lumes das fibras, temperatura de carbonização e taxa de aquecimento.

Em processos industriais, a umidade diminui o rendimento gravimétrico devido à queima de parte do material lenhoso para a vaporização da água. Mas em processos de carbonização com fonte de calor externa, como na mufla, a umidade não afeta o rendimento gravimétrico (Tabela 4) (ROUSSET et al., 2011).

Tabela 4 Rendimento da carbonização em mufla a 450 °C e 5 bars com madeira de diferentes umidade

Umidade (%)	Rendimento Gravimétrico (%)
0	41,7
15	40
110	40,6

Fonte: Rousset et al. (2011)

O rendimento em o licor pirolenhoso é dado pela razão entre massa de licor ao término do processo e massa de madeira no início do processo. A umidade da madeira aumenta o rendimento em licor pirolenhoso, devido a maior presença de água no mesmo. Este aumento acarreta em uma diminuição no rendimento em gases não condensáveis (KLITZKE, 1998) (Tabela 5).

Tabela 5 Rendimento em licor pirolenhoso (%) da madeira de *Mimosa scabrella* Bentham carbonizada em diferentes temperaturas

Umidade	Rendimento em licor pirolenhoso (%)	
	450 °C	550 °C
0	47,19	48,30
15	54,07	54,96
30	58,07	59,02

2.11 Propriedades físicas do carvão

A densidade aparente é a razão entre a massa seca e o volume considerando os espaços vazios, enquanto a densidade verdadeira desconsidera os espaços vazios no cálculo do volume (VALENTE; LELLES, 1979).

A densidade é importante na caracterização do carvão vegetal. Mantendo os outros parâmetros constantes, a densidade deve ser a mais elevada possível, pois a razão entre massa e volume de carvão será maior dentro do

forno, o que permite a otimização do espaço (MENDES; GOMES; OLIVEIRA, 1982).

A lignina tem maior estabilidade às altas temperaturas em relação à holocelulose, desse modo, um maior teor de ligninas na madeira tem correlação positiva com a densidade aparente do carvão vegetal, enquanto o teor de holocelulose apresenta correlação negativa (VALE; DIAS; SANTANA, 2010).

Segundo Klitzke (1998), madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) com cinco anos e com umidade entre 0 e 30 quando carbonização entre 450 e 500 °C, não produziram carvão com densidade aparente diferentes.

A madeira saturada produziu carvão com maior densidade aparente em relação à madeira anidra de eucalipto em condições de pressão maiores que a atmosférica (ROUSSET et al., 2011) (Tabela 6).

Tabela 6 Densidade do carvão em função da umidade da madeira carbonizada sob diferentes pressões

Pressão (bars)	Umidade (%)	Densidade aparente (g/cm ³)
5	0	0,39
5	15	0,37
5	110	0,42
10	0	0,33
10	15	0,37
10	110	0,66

Fonte: Adaptado de Rousset et al. (2011)

A geração de finos tem correlação positiva com a umidade do carvão. Toras de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de umidade, carbonizadas nas mesmas condições, mostraram maior quantidade de finos gerados em umidades mais elevadas (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC, 1982) (Tabela 7).

Tabela 7 Finos gerados de carvão vegetal, em função da umidade

Umidade na madeira	% de Finos abaixo de 13 mm gerados
<20	11,2
20-30	13,5
>30	15,5

Fonte: Cetec (1982)

2.12 Propriedades químicas do carvão

A composição química do carvão vegetal pode ser analisada por meio da análise elementar ou imediata. A primeira oferece como resultado os teores de oxigênio, carbono, hidrogênio e nitrogênio, enquanto a segunda oferece os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (MENDES; MENDES; OLIVEIRA, 1982). A composição química depende da matéria prima utilizada e variáveis do processo, como a temperatura (WENZL, 1970).

A composição elementar do carvão vegetal apresenta, em escala decrescente, carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. O incremento da temperatura final de carbonização aumenta os teores de carbono e nitrogênio em detrimento dos teores de oxigênio e hidrogênio (MARCOS, 1997) (Tabela 8).

Tabela 8 Composição elementar da madeira submetida a tratamento térmico em diferentes temperaturas

Temperatura de carbonização (°C)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)*
100	50,28	6,09	0,19	41,14
250	50,64	5,04	0,25	41,31
350	75,69	3,31	0,62	19,10
400	76,89	3,27	0,40	18,15
450	81,18	2,98	0,41	13,65
500	82,96	2,52	0,66	11,15
550	87,11	2,42	0,50	6,89
600	89,39	2,19	0,43	4,79

Fonte: Marcos (1997)

* O oxigênio foi obtido por diferença

Os materiais voláteis são substâncias desprendidas da madeira na forma de gases durante a queima do carvão ou no processo de carbonização (WENZL, 1970). Altos teores de materiais voláteis implicam em maior expansão gasosa durante a inclusão do carvão vegetal no alto-forno, gerando trincas e porosidade, com isso, tornando o carvão mais frágil (ASSIS; ALMEIDA; PORTO, 1982).

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão. O rendimento em carbono fixo é diretamente proporcional aos teores de ligninas e extrativos. Devido ao grande número de grupos hidroxílicos e baixo teor de carbono é inversamente proporcional ao teor de holocelulose (OLIVEIRA, 1988). Utilizando como base um alto forno sob as mesmas condições operacionais, o incremento do teor de carbono fixo acarreta na melhor utilização volumétrica do alto forno (ASSIS; ALMEIDA; PORTO, 1982).

As cinzas do carvão vegetal têm como origem os minerais da madeira. Segundo Cotta (1996), o fósforo e o enxofre, em determinadas proporções podem ser fixados no carvão vegetal em quantidades prejudiciais. O teor médio

aceitável desses elementos na constituição do ferro-gusa situa-se ao redor de 0,1%. Tais minerais podem provocar a segregação, fenômeno caracterizado pelo acúmulo de impurezas, que na impossibilidade de se deslocarem no metal solidificado, vão sendo repelidas para o centro das peças, como o processo de solidificação se inicia na periferia, isto provoca variações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos produtos, tornando-os duros, quebradiços, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de fissuras (COTTA, 1996).

A umidade da madeira entre 0 e 30 % não influenciou a análise imediata do carvão proveniente de bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) de cinco anos de idade nas temperaturas de carbonização de 450 e 500 °C (Tabela 9) (KLITZKE, 1998).

Tabela 9 Influência da umidade da madeira na composição química imediata do carvão

Umidade (%)	Teor de carbono fixo(%)	
	450 °C	550 °C
0	74,42	83,84
15	71,92	84,70
30	74,82	84,73
	Teor de cinzas (%)	
	450 °C	550 °C
0	1,43	1,24
15	1,30	1,49
30	1,41	1,43

“Tabela 9, conclusão”

Umidade (%)	Teor de voláteis (%)	
	450 °C	550 °C
0 %	24,15	14,92
15 %	26,78	13,80
30 %	23,77	13,85

Fonte: Adaptado de Klitzke (1998)

2.13 Poder calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de calor liberada para o ambiente durante o processo de combustão completa por unidade de massa, sendo comumente expressada em cal/g para combustíveis sólidos (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982). O poder calorífico do carvão vegetal depende da madeira e de variáveis do processo, como a temperatura final de carbonização (BRITO; BARRICHELO, 1977; TROSSERO, 1981).

Segundo Swithenbank et al. (2011), a umidade afeta negativamente o poder calorífico da madeira. Para cada 10% de aumento da umidade ocorre redução de 2 MJ/kg no poder calorífico. Entretanto, não é necessário que a madeira esteja completamente seca para que essa vantagem seja obtida. O incremento do poder calorífico com a redução da umidade quando esta se encontra baixa não é vantajoso diante do tempo necessário à secagem, este cálculo é bem específico e varia para cada espécie e região.

No poder calorífico superior (PCS), o calor demandado para evaporar a água formada durante a combustão do hidrogênio e a umidade do carvão não são contabilizados (COUTINHO, 1984). O poder calorífico inferior (PCI) é utilizado quando a combustão é efetuada a pressão constante. Quando isso ocorre, a água

de combustão não é condensada e a liberação da mesma ocorre na forma de vapor com a queima direta da madeira (COUTINHO, 1984).

A influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) mostrou uma correlação negativa com o poder calorífico inferior, isso porque parte da energia da madeira é utilizada para retirada da água do sistema (FARINHAQUE, 1981).

Em madeiras de *Eucalyptus* secas ao ar livre, o tempo de secagem aumentou o poder calorífico. O incremento no poder calorífico líquido foi maior nos primeiros meses, devido a maior perda de água da madeira neste período (BRAND et al., 2011) (Tabela 10).

Tabela 10 Influência da umidade no poder calorífico em toras de *Eucalyptus*

Tempo de estocagem (meses)	Poder calorífico superior (Kcal/Kg)	Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)
0	4542	1646
2	4615	2204
4	4616	2624
6	4606	2746

Fonte: Brand et al. (2011)

O poder calorífico inferior representa melhor o comportamento do combustível nos processos técnicos, visto que na carbonização, a água é liberada na forma de vapor, o que demanda a energia correspondente ao calor latente de vaporização.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material de estudo

Foram selecionados três indivíduos do clone VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) e Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*), provenientes da empresa VM Florestal Ltda e três indivíduos de *Corymbia citriodora* provenientes da empresa Cenibra S.A., produzidos via seminal totalizando nove indivíduos. Para a secagem foram retiradas toras de 1 metro na base, a 50 % e a 100% da altura comercial.

A média das alturas dos materiais genéticos analisados para secagem variou entre 22,65 e 30,45 m. O diâmetro da base variou entre 17,88 e 20,34 cm, o diâmetro do meio de 12,56 a 14,23 cm e o diâmetro do topo de 4,3 a 4,6 cm (Tabela 11).

Tabela 11 Diâmetro médio das toras e altura comercial média das árvores de *Eucalyptus* e *Corymbia* avaliadas

Material	Diâmetro da base (cm)	Diâmetro do meio (cm)	Diâmetro do topo (cm)	Altura das árvores (m)
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	20,34	14,23	4,6	30,45
Vm 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	19,45	13,34	4,7	29,45
<i>Corymbia citriodora</i>	17,88	12,56	4,3	22,65

Para a carbonização, foi retirada uma tora de um metro logo acima da tora da base destinada para secagem. Os diâmetros das toras foram 19,84; 18,66 e 17,01 cm para os materiais de Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*); Vm 4 (*Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora* respectivamente.

As toras foram agrupadas de forma a não terem contato uma com a outra e impermeabilizadas nas superfícies transversais com base asfáltica.

3.2 Densidade básica

Foi retirado um disco na base, 50% e 100% da altura comercial, onde duas amostras com umidade acima do ponto de saturação das fibras imersas em água para determinação do volume. Estas mesmas amostras foram colocadas em estufa a 103 °C para determinação da massa seca conforme norma NBR 11941:2003 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2003).

3.3 Máximo teor de umidade

Uma curva de perda de umidade das toras foi feita para cada material genético. O máximo teor de umidade foi calculado conforme equação 3, sendo 1,54 referente a densidade da parede celular em g/cm³:

$$MTU(\%) = ((1,54 - Db) / (1,54 \times Db)) \times 100 \quad (3)$$

em que:

MTU = máximo teor de umidade (%)

Db = densidade básica da madeira (g/cm³).

A taxa de secagem foi calculada conforme equação 4:

$$Ts = (PU/D) \quad (4)$$

em que:

Ts = Taxa de secagem (%/dia)

PU= perda de umidade com base na massa seca (%),

D= período de secagem (dias).

3.4 Secagem do material

Foi avaliada a secagem de todas as toras, que foram acondicionados em local coberto, a umidade inicial das toras foi calculada por meio de amostras determinadoras de umidade (Figura 1).

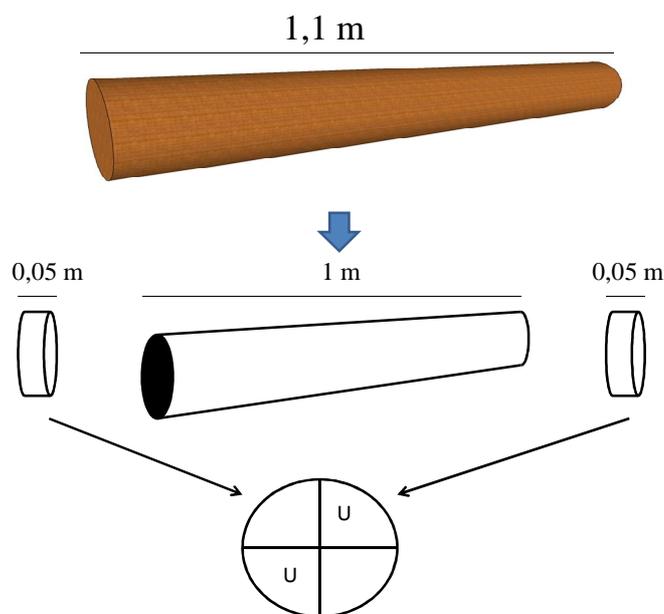


Figura 1 Retirada de discos para determinação da umidade da madeira; U: cunhas destinadas para determinação da umidade

Para a secagem, nos primeiros 20 dias, a pesagem foi em dias alternados, nos 30 dias seguintes, a pesagem ocorreu em intervalos de quatro

dias, por fins nos 40 dias seguintes, a pesagem ocorreu em intervalos de sete dias, totalizando assim 90 dias de secagem. Para cada material foi feito a curva de perda de umidade e modelo de secagem.

A taxa de secagem foi calculada pela porcentagem de perda de água com base na massa seca dividida pelo tempo de estocagem.

3.5 Poder calorífico da madeira

O poder calorífico superior da madeira das amostras da base foi avaliado conforme norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

3.6 Carbonização da madeira

Para carbonização da madeira, foi cortado um disco de um centímetro de espessura para eliminação da área com impermeabilizante. Logo após foram retirados discos de cinco centímetros de cada extremidade das toras da base, totalizando dois discos, que foram divididos em cunhas. As amostras foram misturadas, e com elas foram realizadas as carbonizações e a determinação da umidade (Figura 2).

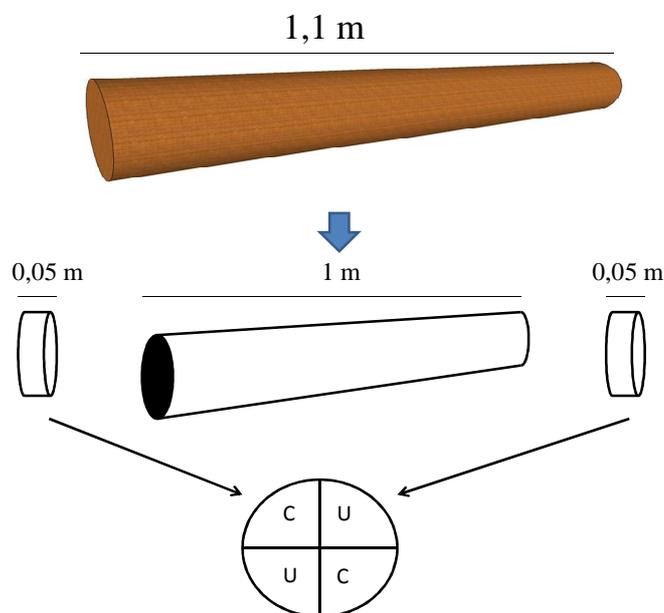


Figura 2 Retirada de discos para determinação da umidade da madeira e para carbonização; U: cunhas destinadas para determinação da umidade; C: cunhas destinadas a carbonização

Cada caule carbonizado de cada material genético consistiu em uma repetição, desse modo o experimento possuiu três repetições. Os tratamentos foram carbonizações após 30, 60 e de 90 dias de secagem e na condição anidra, totalizando quatro tratamentos e 12 carbonizações. A taxa de aquecimento foi de 1,67 °C/minuto, temperatura final de 350 °C e tempo de residência de 30 minutos. Foi estimado o rendimento gravimétrico na base seca e úmida (Equação 5 e 6).

$$RGbs (\%) = \frac{M_{bsx} (100)}{M_{ma}} \quad (5)$$

Onde:

RGbs (%) = rendimento gravimétrico na base seca, em porcentagem

Mbs = Massa seca do carvão (g)

Mma = Massa da madeira anidra (g)

$$\text{RGbu (\%)} = \frac{\text{Mbu} \times (100)}{\text{Mmu}} \quad (6)$$

Onde:

RGbu (%) = rendimento gravimétrico na base umida em porcentagem

Mbu = Massa seca do carvão (g)

Mmu = Massa da madeira no respectivo teor de umidade (g)

Também foi feita a análise imediata, poder calorífico superior e densidade relativa aparente (Tabela 12).

Tabela 12 Testes de carbonização

Teste	Norma
Análise imediata	NBR 8112 (ABNT, 1986)
Poder calorífico superior	NBR 8633 (ABNT, 1984)
Densidade relativa aparente	NBR 9165 (ABNT, 1985)

O poder calorífico líquido foi calculado conforme equação de TILLMAN (Equação 7).

$$\text{PCI} = \text{PCs} - (0,0114 \times \text{PCs} \times \text{U (\%)}) \quad (7)$$

Onde:

PCI= poder calorífico líquido;

PCs= poder calorífico superior;

U (%) = umidade da madeira, na base úmida, em porcentagem.

3.7 Análise dos resultados

Para a relação da umidade com o tempo de secagem, foi utilizado o programa Curve expert 1.3 a fim de avaliar o melhor modelo de regressão e seus parâmetros.

Para a escolha do melhor modelo para estimar a umidade da madeira em função do tempo de secagem foram considerados o coeficiente de determinação, o erro padrão residual e a distribuição dos resíduos apresentada por 60 modelos testados pelo curve expert 1.3.

Para os testes de carbonização e poder calorífico da madeira, foi realizado uma análise de variância (ANOVA), com delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Para as variáveis analisadas que apresentarem diferenças estatísticas significativas foi aplicado o teste de comparação de médias pelo método de TUKEY a 95% de probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Secagem da madeira

A umidade inicial média de *Eucalyptus* e *Corymbia* variou de 78,47 a 121,52% para as toras da base; 75,43 a 112,59 % para as toras do meio e de 67,72 a 126,15% para as toras do topo (Tabela 13). Os materiais genéticos de *Corymbia citriodora* e o Vm 4 (*E. urophylla*) apresentaram umidade inicial média maior na base, enquanto Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) apresentou maior umidade na região do topo. O padrão de distribuição da umidade no sentido longitudinal variou para espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* (OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005). A umidade inicial foi compatível com os valores de 59,6 a 159 % para espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus* (BRAND et al., 2011; MOYA; TENÓRIO; MEYER, 2012; OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005; REZENDE et al., 2010a). Estes valores são influenciados pelo tempo decorrido desde o corte das árvores até a pesagem, além de fatores como presença ou ausência de casca e época do ano. Entretanto, neste trabalho, como as árvores foram cortadas no mesmo período e pesadas logo após o abate, o erro tende a ser reduzido.

A densidade básica média dos materiais genéticos variou de 0,497 a 0,665 g/cm³ para as toras da base; de 0,507 a 0,683 g/cm³ para as toras do meio e entre 0,517 a 0,673 g/cm³ para as toras do topo (Tabela 13). Os maiores valores foram para *Corymbia citriodora* em todas as regiões, enquanto o clone MN463 (*E. urophylla*) apresentou os menores valores em todas as regiões.

Os resultados para a densidade básica dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* estão de acordo com os da literatura, entre 0,429 e 0,596 g/cm³ e entre 0,575 e 0,634, respectivamente (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010; LEMOS et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; SANTOS et al., 2011).

Tabela 13 Umidade inicial, densidade e máximo teor de umidade médio das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Material Genético	Umidade inicial das toras (%)		
	Base	Meio	Topo
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	121,52	112,59	126,15
Vm 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	94,54	82,52	80,99
<i>Corymbia citriodora</i>	78,47	75,43	67,72
	Densidade básica (g/cm ³)		
	Base	Meio	Topo
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	0,497	0,507	0,517
Vm 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	0,528	0,571	0,567
<i>Corymbia citriodora</i>	0,665	0,683	0,673
	Máximo teor de umidade (%)		
	Base	Meio	Topo
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	136,27	132,30	121,28
Vm 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	124,46	110,20	97,40
<i>Corymbia citriodora</i>	85,44	81,48	79,37

Considerando apenas as toras da base dos materiais genéticos observou-se uma correlação de $r = -0,8821$ entre a densidade básica e a umidade inicial e de $0,9967$ entre o máximo teor de umidade e a umidade inicial (Figura 2). Os menores valores para a umidade inicial observada e estimada por meio do máximo teor de umidade (MTU) foram de 70,51 e 77, 82% respectivamente, enquanto o maior valores para umidade inicial observada e estimada foram 122,33 e 139,76% respectivamente (Figura 3). A umidade observada no

primeiro e segundo casos foi de 90,22% e 88,53% do Máximo Teor de Umidade (MTU).

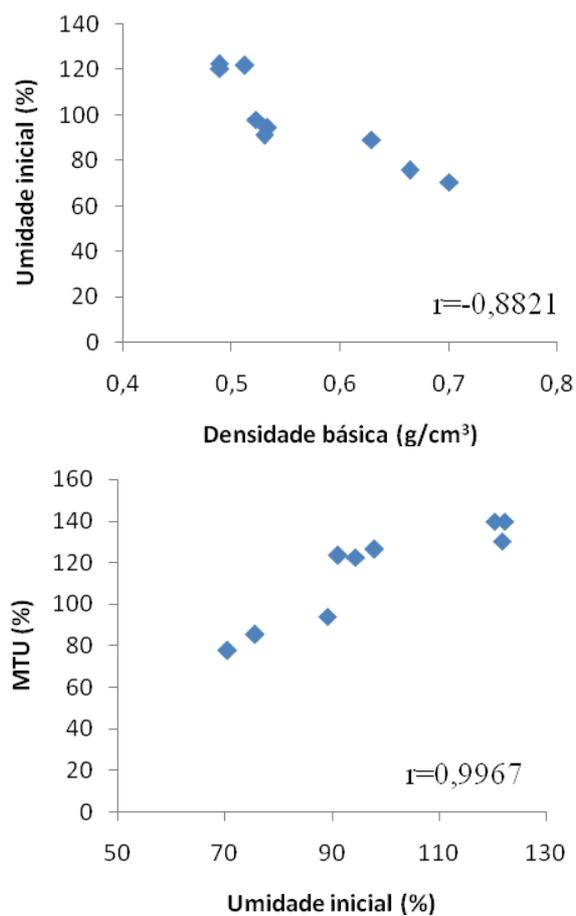


Figura 3 Relação entre a umidade inicial e a densidade básica e entre máximo teor de umidade (MTU) e umidade inicial das toras da base de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Madeira com baixa densidade apresenta mais espaços vazios a serem preenchidos por água, como cavidades celulares e espaços intercelulares,

incluindo vasos e canais resiníferos, o que resulta em alta umidade da mesma (SKAAR, 1972).

A densidade da madeira e a taxa média de secagem das toras da base durante 90 dias apresentaram correlação negativa com $r=-0.8604$ e a densidade básica e umidade final das toras apresentou $r=-0.831$ (Figura 4). A densidade apresentou alta correlação com a umidade inicial, taxa de secagem e umidade final. Desse modo, se pode criar modelos de predição de secagem com base na densidade básica.

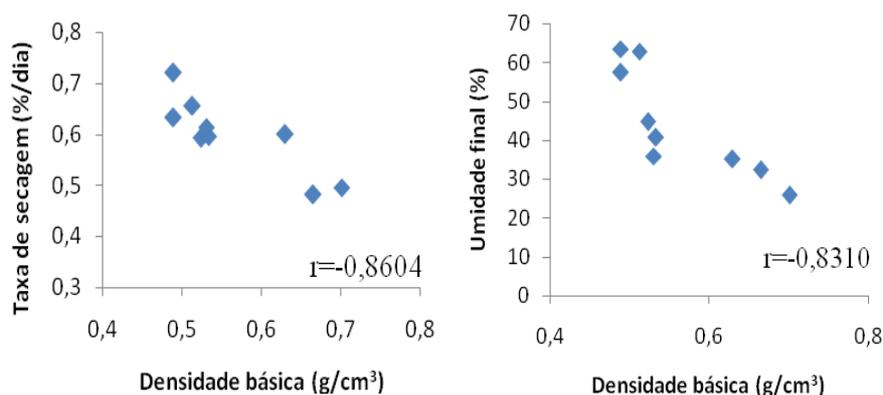


Figura 4 Relação entre a densidade básica e taxa de secagem em 90 dias e com a umidade final das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* da base

Toras com baixa densidade apresentam maior taxa de secagem, pois a água livre é mais fácil de ser removida (BERBEROVIC; MILOTA, 2011; MUGABI et al., 2010). Este fato não foi suficiente para compensar a maior umidade inicial das mesmas. Por isto, toras com maior densidade apresentaram menor umidade no período de secagem de 90 dias.

A umidade média final de *Eucalyptus* e *Corymbia* variou de 31,13 e 61,28 % para as toras da base, de 20,48 a 35,15% para as toras do meio e de

15,96 a 17,07% para as toras do topo (Tabela 16). Devido ao menor diâmetro, as amostras do topo apresentaram altas taxas de secagem no primeiro mês, semelhante ao relatado para madeira serrada de *Betula papyrifera*, *Cryptomeria japonica* (BEDAME et al., 2011; HERMAWAN; FUJIMOTO; SAKAGAMI, 2012) e roliça de *Eucalyptus grandis* (REZENDE et al., 2010a).

As toras do Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) apresentaram maior umidade inicial, que foi facilmente removida devido ao menor caminho a ser percorrido pela água, alcançando taxa de secagem de 3,52% no primeiro mês, as toras de *Corymbia citriodora* e Vm 4 (*Eucalyptus urophylla*) apresentaram taxa de secagem de 1,59 e 1,90%, respectivamente. O segundo e terceiro mês foram caracterizados por taxas de secagem baixas, mostrando que os caules já estavam próximos da condição de equilíbrio com o ambiente. Todos os caules do topo alcançaram umidade inferior a 35%, recomendada para carbonização (Tabela 16).

As toras da região do meio dos clones Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*); Vm4 (*Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora* apresentaram umidade de 33,15; 29,24 e 20,49%, respectivamente. Todos alcançaram umidade inferior a 35%, recomendada para carbonização (Tabela 16).

As toras da base tiveram a secagem dificultada devido ao maior diâmetro das peças, apresentando menor taxa de secagem. Os clones Mn463 (*Eucalyptus urophylla*); Vm4 (*Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora* apresentaram umidade de 61,28%; 40,47 e 31,13% respectivamente. Apenas os caules de *Corymbia citriodora* apresentaram umidade inferior a 35%, recomendada para carbonização (tabela 14).

Tabela 14 Taxa de secagem das toras em diferentes períodos e umidade final após 90 dias de secagem

Material	Região	Taxa 1 (%/dia)	Taxa 2 (%/dia)	Taxa 3 (%/dia)	Taxa 4 (%/dia)	Umidade final das toras (%)
Mn 463 (<i>Eucalyptus</i> <i>urophylla</i>)	Base	1,31	0,449	0,221	0,67	61,28
	Meio	1,94	0,467	0,186	0,88	33,15
	Topo	3,52	0,037	0,005	1,22	15,98
Vm 4 (<i>Eucalyptus</i> <i>urophylla</i>)	Base	1,19	0,359	0,229	0,60	40,47
	Meio	1,36	0,229	0,153	0,59	29,24
	Topo	1,90	0,204	0,001	0,72	15,87
<i>Corymbia</i> <i>citriodora</i>	Base	1,14	0,26	0,144	0,52	31,13
	Meio	1,47	0,22	0,094	0,61	20,49
	Topo	1,59	0,01	0,037	0,56	17,07

Nota: Taxa 1: Taxa de secagem nos primeiros 30 dias; Taxa 2: taxa de secagem dos 30 dias seguintes; Taxa 3: taxa de secagem dos últimos 30 dias; Taxa4: taxa de secagem dos 90 dias de secagem.

As curvas de perda de umidade mostram o comportamento da secagem ao longo do tempo. Houve maior perda de umidade nos primeiros 15 dias (Figura 5). Rezende et al. (2010a), avaliando toras de *Eucalyptus urophylla* de diâmetro semelhante as toras da base e meio, encontram umidade média de 63% e 43% respectivamente. Vital, Della Lucia e Valente (1985), ao avaliar a secagem de toras de *Eucalyptus* em Viçosa-MG com diâmetro superior a 12,0 cm, encontraram umidade próxima de 55% após 175 dias de secagem ao ar livre e para as toras entre 4,0 a 12,0 cm, a umidade variou de 16% a 27%.

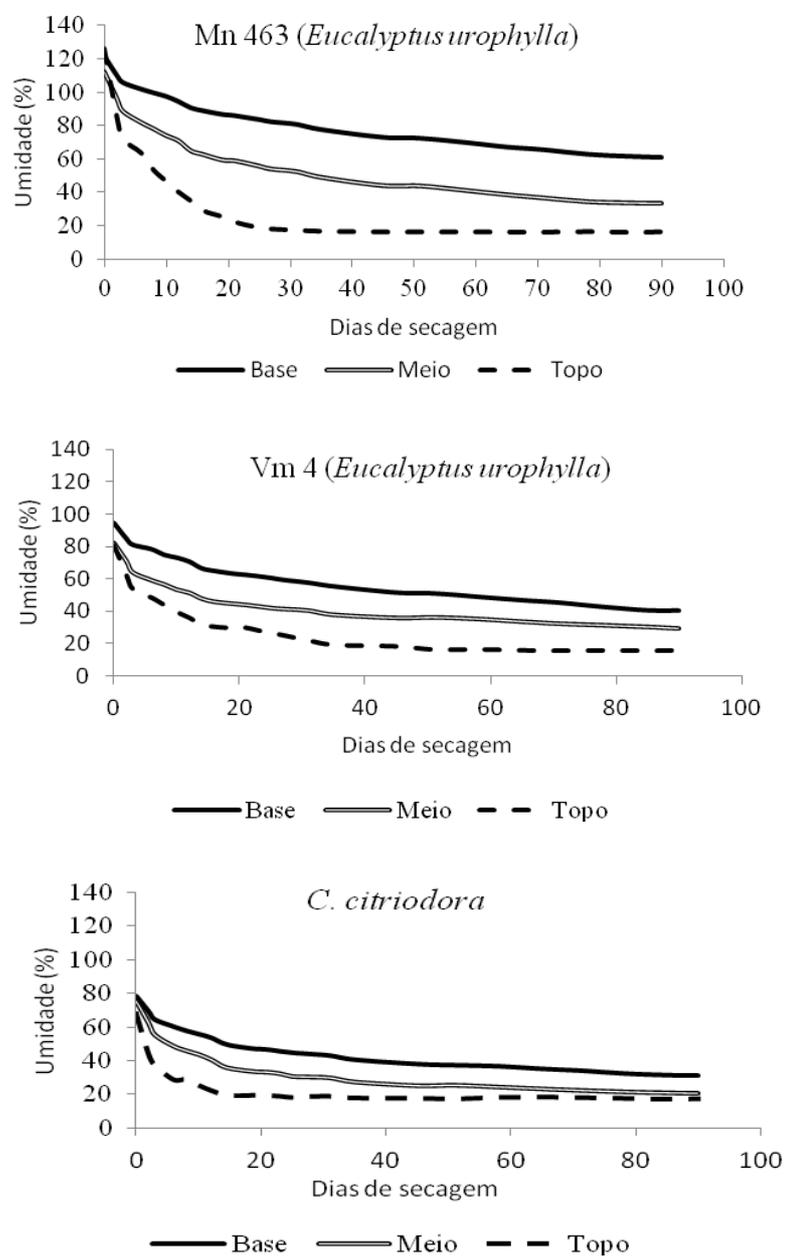


Figura 5 Curva de secagem de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função do tempo de secagem

Entre os modelos avaliados, o modelo logístico apresentou maior coeficiente de determinação e menor erro padrão residual, sendo o modelo escolhido para representação dos modelos para estimar a umidade (Equação 8).

$$U (\%) = \frac{\alpha}{1 + \beta \times e^{-\gamma \times \text{dias}}} \quad (8)$$

Onde:

U= Umidade em porcentagem

α, β, γ = Parâmetros do modelo

Dias = Número de dias de secagem

As equações ajustadas do modelo logístico para umidade das toras em função do tempo em dias para as toras do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) para diferentes posições longitudinais ao longo da árvore estão representados na Tabela 15.

Tabela 15 Equações ajustadas para umidade das toras do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) em função dos dias de secagem

Região axial	Equações ajustadas para o clone Mn 463
Base	$U (\%) = \frac{58,45383}{1 - 0,4968 \times e^{0,021081 \times \text{dias}}}$
Meio	$U (\%) = \frac{30,81752}{1 - 0,71616 \times e^{-0,20264 \times \text{dias}}}$
Topo	$U (\%) = \frac{10,07958}{1 - 0,92052 \times e^{-0,018606 \times \text{dias}}}$

O coeficiente de determinação para o clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) foi de 98,50% para as toras da base, 99,30% para as toras do meio e 98,95% para as toras do topo, evidenciado a qualidade do ajuste da equação.

Os valores do erro padrão residual da equação foram 2,81% para as toras da base, 3,94% para as toras do meio e 4,05% para as toras do topo, valores baixos, o que evidencia a qualidade dos modelos.

A umidade estimada das toras acompanhou a umidade observada para todas as regiões das árvores de Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) (Figura 6).

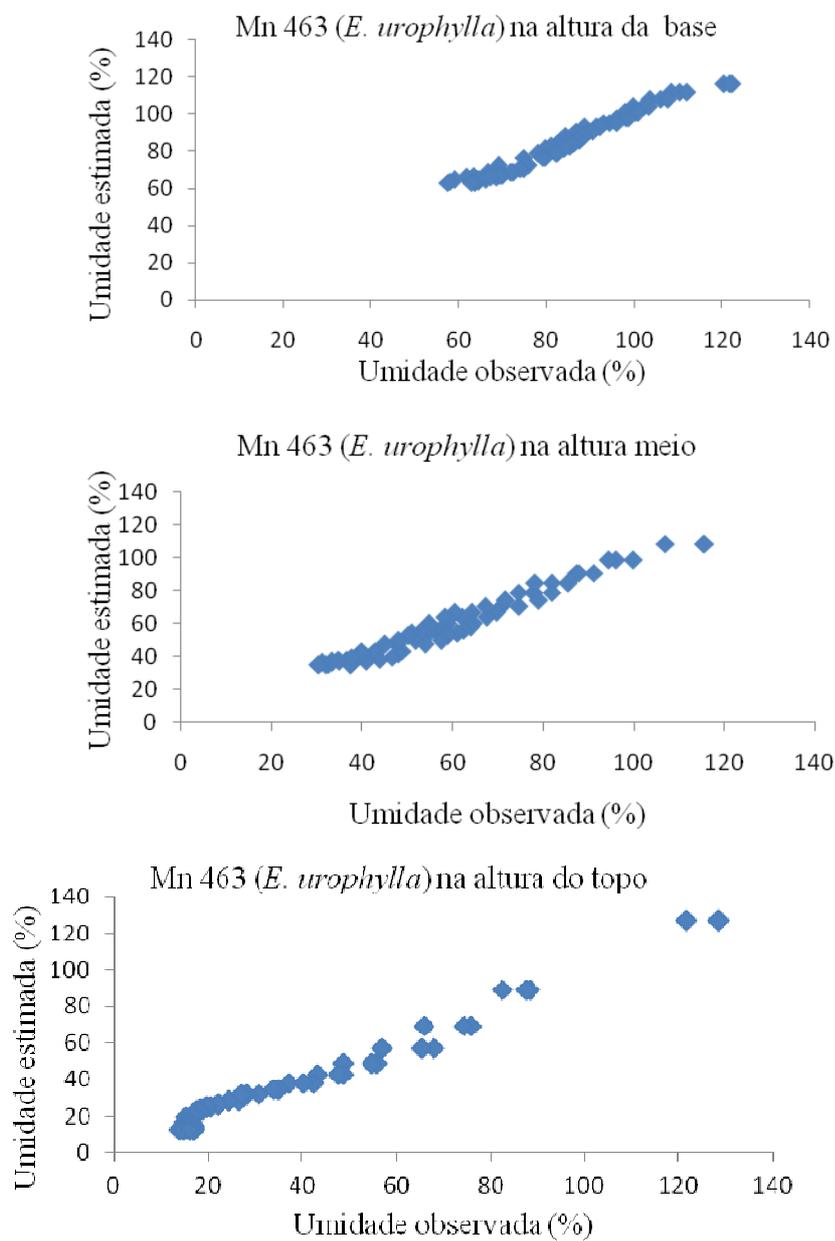


Figura 6 Relação entre umidade real e umidade observada para toras do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*)

A distribuição dos resíduos para as toras do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) para as três regiões esta representado na figura 7, a distribuição dos resíduos foi mais homogênea para as toras da base, seguida pelas toras do meio e por fim as toras do topo.

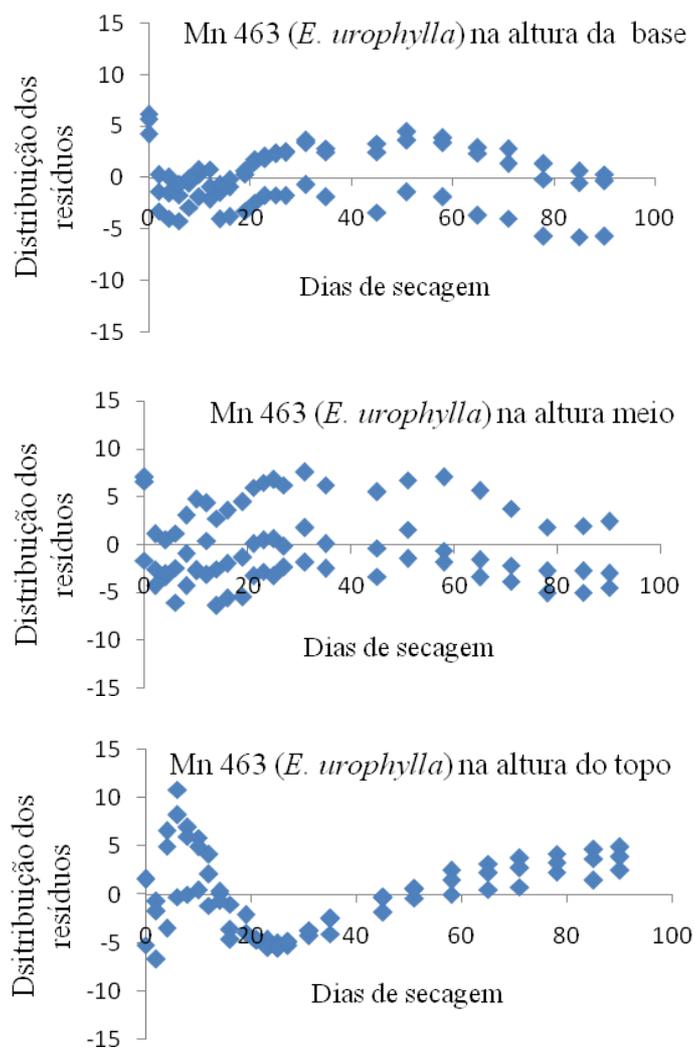


Figura 7 Distribuição dos resíduos para as toras do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*)

As equações ajustadas do modelo logístico para unidade das toras em função do tempo em dias para as toras do clone VM 4 (*Eucalyptus urophylla*)

para diferentes posições longitudinais ao longo da árvore estão representados na Tabela 16.

Tabela 16 Equações ajustadas para umidade das toras do clone VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) em função dos dias de secagem

Região axial	Equações ajustadas para o clone VM 4
Base	$U (\%) = \frac{37,81405}{1 - 0,5827 \times e^{-0,018523 \times \text{dias}}}$
Meio	$U (\%) = \frac{22,02587}{1 - 0,64553 \times e^{-0,027973 \times \text{dias}}}$
Topo	$U (\%) = \frac{14,23123}{1 - 0,77468 \times e^{0,029553 \times \text{dias}}}$

O coeficiente de determinação para árvores do clone VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) foi de 96,46% para as toras da base, 99,13% para as toras do meio e 90,97% para as toras do topo, evidenciando a qualidade do ajuste das respectivas equações.

Os valores do erro padrão residual da equação foram 3,96% para as toras da base, 1,46% para as toras do meio e 3,22% para as toras do topo, tais valores foram baixos, evidenciando a qualidade dos modelos.

A umidade estimada das toras acompanhou a umidade observada para todas as regiões das árvores do clone VM4 (*Eucalyptus urophylla*) (Figura 8).

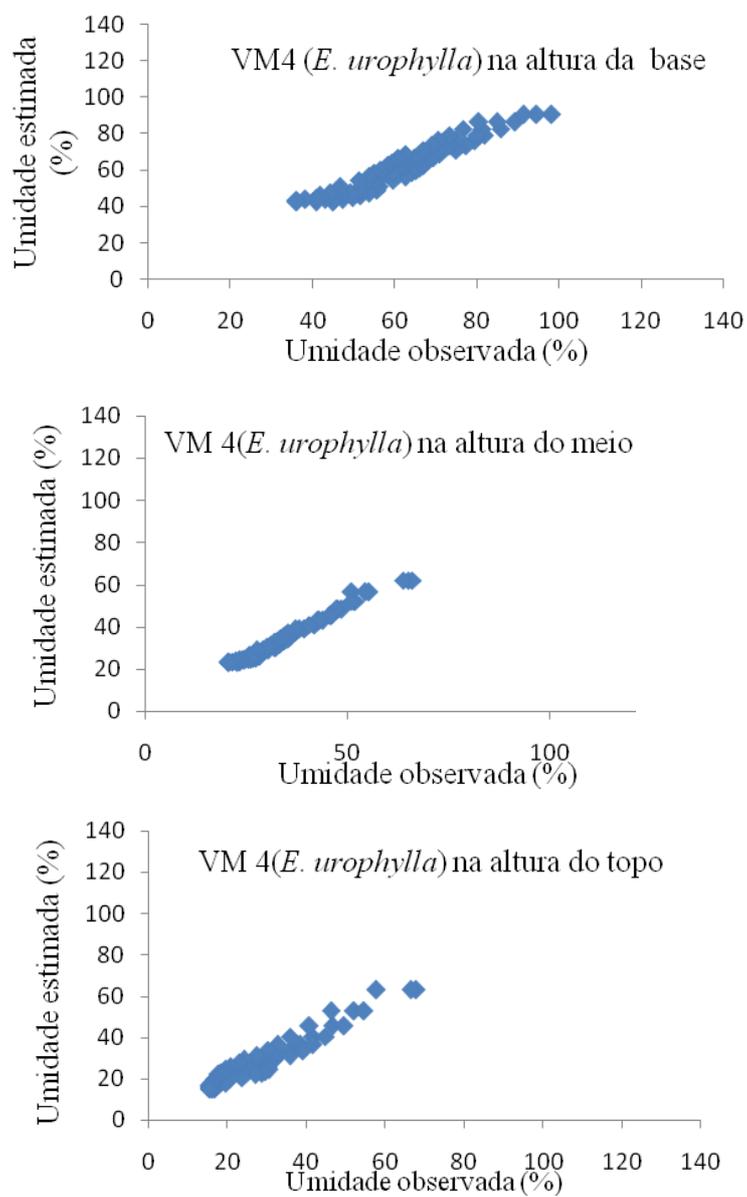


Figura 8 Relação entre umidade real e umidade observada para toras do clone VM 463 (*Eucalyptus urophylla*)

A distribuição dos resíduos, para as toras do clone VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) para as três regiões, está representado na Figura 9. Verifica-se que o melhor padrão de distribuição residual ocorreu na posição mediana.

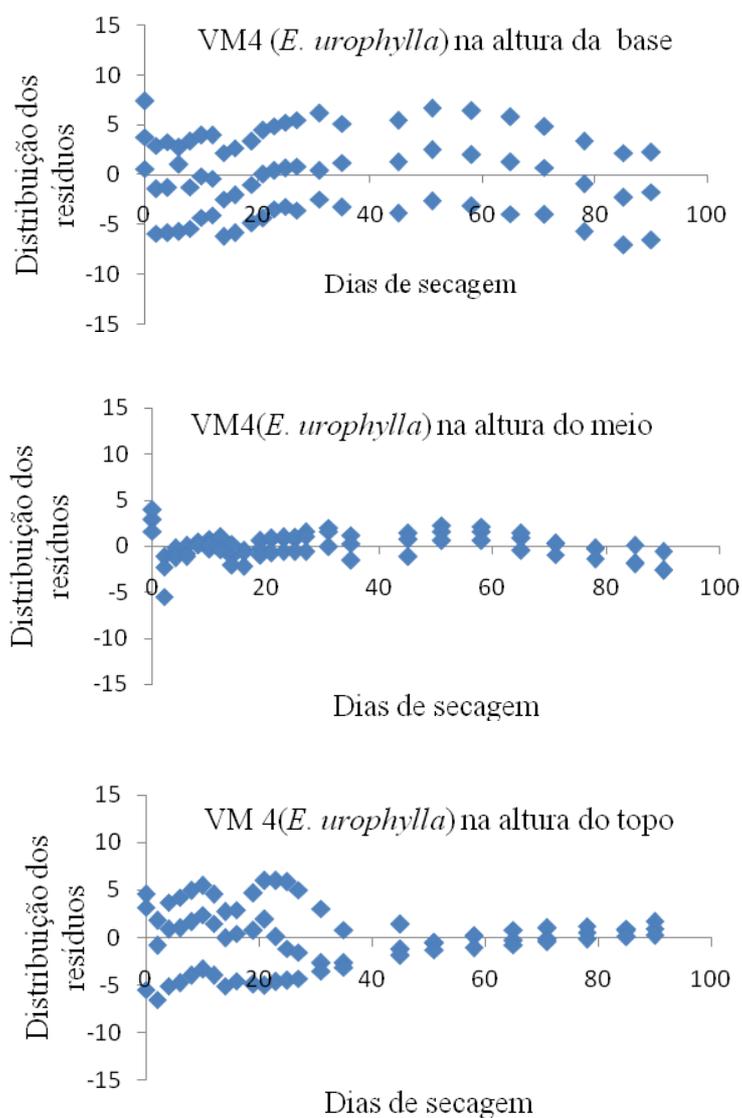


Figura 9 Distribuição dos resíduos para as toras do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*)

As equações ajustadas do modelo logístico para umidade das toras em função do tempo em dias para as toras de *Corymbia citriodora* para diferentes posições longitudinais ao longo da árvore estão representados na Tabela 17.

Tabela 17 Equações ajustadas para umidade das toras do clone de *Corymbia citriodora* em função dos dias de secagem

Região axial	Equações ajustadas para toras de <i>Corymbia citriodora</i>
Base	$U (\%) = \frac{31,490299}{1 - 0,5844902 \times e^{-0,02901522 \times \text{dias}}}$
Meio	$U (\%) = \frac{21,273662}{1 - 0,71245951 \times e^{-0,085125286 \times \text{dias}}}$
Topo	$U (\%) = \frac{17,199764}{1 - 0,74565603 \times e^{-0,095584502 \times \text{dias}}}$

O coeficiente de determinação para *Corymbia citriodora* foi de 92,10% para as toras da base, 96,91% para as toras do meio e 96,88% para as toras do topo, evidenciando o percentual da variação da umidade explicado pelas respectivas equações. Os valores do erro padrão residual da equação foram baixos, 5,56% para as toras da base, 4,67% para as toras do meio e 4,76% para as toras do topo. Representando em média a variação entre os valores reais de umidade e os estimados pelas equações. Os indivíduos de *Corymbia citriodora* foram produzidos via seminal, desse modo houve maior variação entre os indivíduos aumentando o erro padrão residual das equações.

A umidade estimada acompanhou a umidade observada para todas as toras de *Corymbia citriodora* (figura 10).

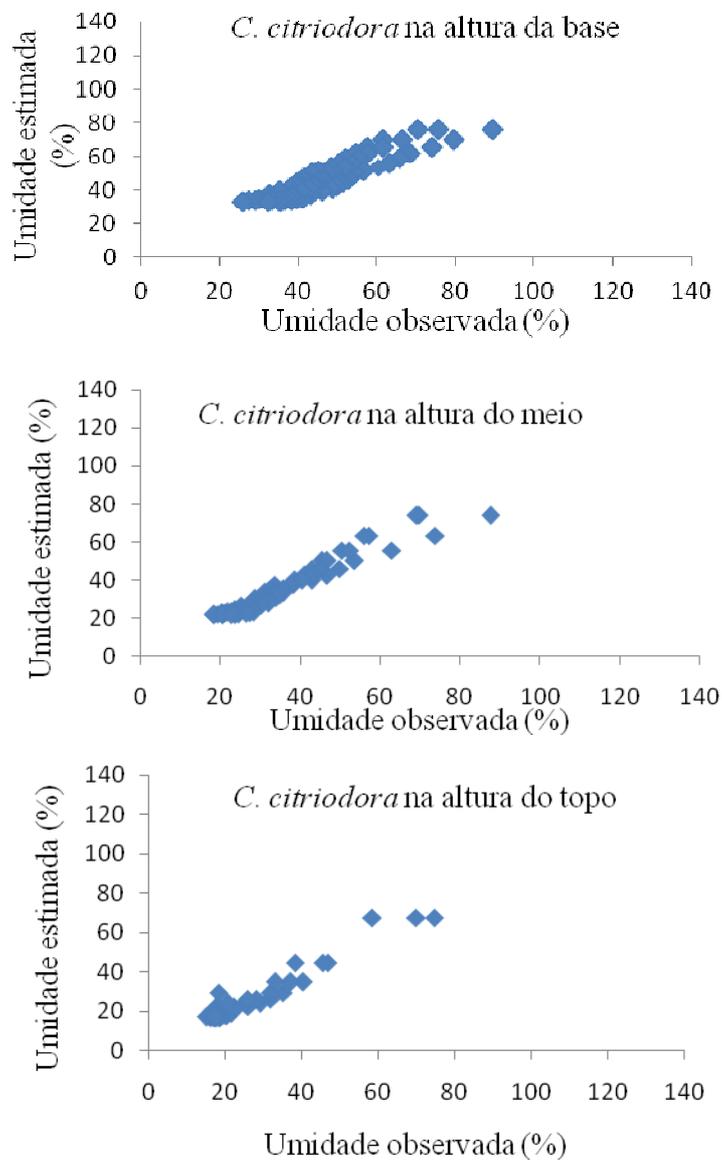


Figura 10 Relação entre umidade estimada e umidade observada para toras de *Corymbia citriodora*

A distribuição dos resíduos para a umidade das toras de *Corymbia citriodora* foi mais dispersa no período inicial da secagem, quando a umidade das toras apresentou maior variação entre os indivíduos, tendendo a ser menor no final da secagem (Figura 11).

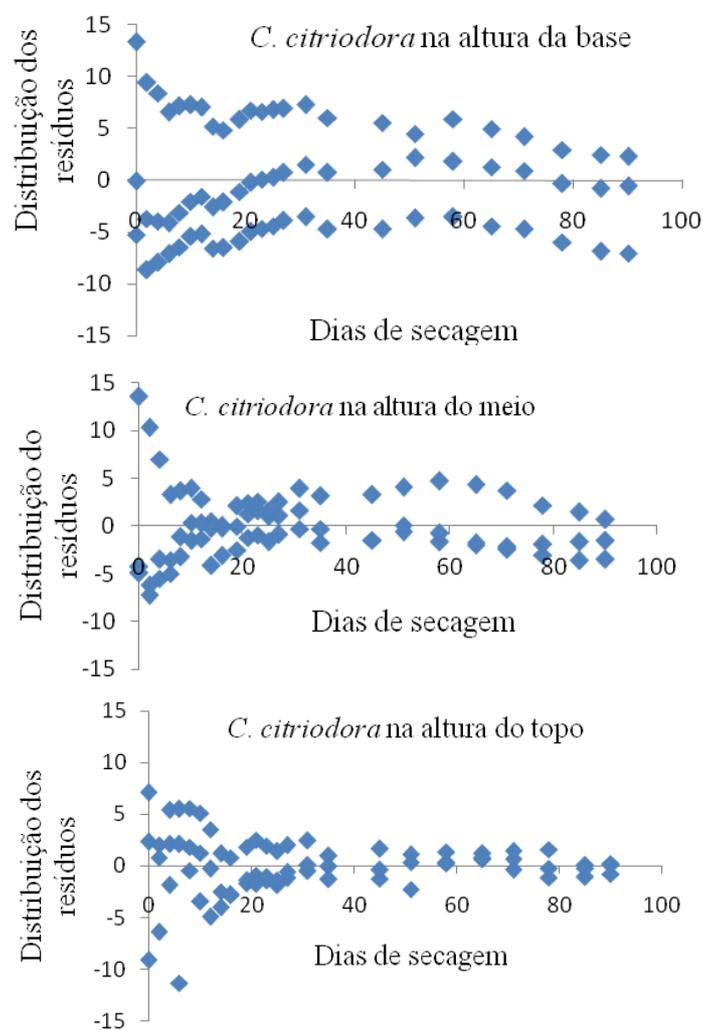


Figura 11 Distribuição dos resíduos para as toras de *Corymbia citriodora*

4.2 Propriedades energéticas da madeira e do carvão

A umidade média das toras destinadas à carbonização variou entre 78,39 e 119,74% para as toras recém abatidas, entre 40,64 e 76,94 após o primeiro mês de secagem, entre 32,12 e 66,65 para o segundo mês de secagem e entre 26,45 e 57,65% após o terceiro mês de secagem (Tabela 18).

Tabela 18 Umidade das toras destinadas à carbonização nos diferentes períodos avaliados

Material genético	Umidade 1 (%)	Umidade 2 (%)	Umidade 3 (%)	Umidade 4 (%)
<i>Corymbia citriodora</i>	78,39	40,64	32,12	26,45
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	119,74	76,94	66,65	57,65
VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	89,45	52,80	44,18	35,44

Umidade 1: Umidade das toras recém abatidas; Umidade 2: Umidade das toras após um mês de secagem; Umidade 3: Umidade das toras após dois meses de secagem; Umidade 4: Umidade das toras após três meses de secagem.

O poder calorífico superior da madeira do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*); VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora* variou de 4605 a 4773 cal/g. O poder calorífico líquido variou entre 1813 e 2298 cal/g para as toras recém abatidas, 2414 e 3088 cal/g para as toras com um mês de secagem, 2604 a 3329 cal/g para dois meses de secagem e entre 2791 e 3507 cal/g (Tabela 19). Os resultados para poder calorífico superior são semelhantes aos relatados para os gêneros *Eucalyptus*, *Pinus*, entre 4250 e 4796 cal/g (BRAND; MUÑIZ, 2010; MONTEIRO; LIMA; TRUGILHO et al, 2005; SANTOS et al., 2011; VALE et al., 2000).

Tabela 19 Poder calorífico superior e líquido da madeira do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*); VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) e *Corymbia citriodora*

Material genético	PCS (cal/g)	PCL1 (cal/g)	PCL2 (cal/g)	PCL3 (cal/g)	PCI4 (cal/g)
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	4773 Ab	1813 Eb	2414 Dc	2604 Cc	2791 Bc
VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	4755 Ab	2196 Ea	2882 Db	3094 Cb	3337 Bb
<i>Corymbia citriodora</i>	4605 Aa	2298 Ea	3088 Da	3329 Ca	3507 Ba

Nota: Poder calorífico líquido das toras após o abate (PCL1); após um mês de secagem (PCL2); dois meses de secagem (PCL3) e após três meses de secagem (PCL4); Médias na vertical seguidas de mesma letra minúscula e maiúscula na horizontal não diferem pelo teste Tukey a 5%, respectivamente.

O poder calorífico aumenta com o tempo de secagem. O ganho percentual do poder calorífico do poder calorífico líquido após 30 dias de secagem ficou em torno de 30%, passados mais 30 dias de secagem, o PCL aumentou mais 8%. Com mais 30 dias de secagem, foram adicionados mais 7% no PCL. Entre o abate das toras e 90 dias de secagem houve um ganho de 54% no PCL, é esperado que esse ganho resulte também em ganho no rendimento gravimétrico e no tempo de carbonização.

Corymbia citriodora apresentou o menor valor para o poder calorífico superior, entretanto como apresentou menor umidade nas quatro avaliações, o poder calorífico líquido destes materiais foi maior, evidenciando a importância da secagem para melhor aproveitamento energético da madeira. Entre os tratamentos, os melhores resultados foram encontrados para a madeira seca por 90 dias.

O rendimento gravimétrico da madeira, na base úmida, variou entre 19,53 e 20,88% para o primeiro mês de estocagem, 20,22 e 22,65% para o

segundo mês, 22,99 e 23,78 % para o terceiro mês e entre 29,78 e 34,22 % para a madeira anidra carbonizada (Tabela 20).

Tabela 20 Rendimento gravimétrico na produção do carvão após secagem e na condição anidra

Material	Tratamentos	Rend. Grav. base úmida (%)	Rend. Grav. base seca (%)
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	T1	19,13 d	34,88 a
	T2	20,72 c	33,45 b
	T3	23,09 b	32,75 b
	T4	34,22 a	34,22 a
VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	T1	20,65 d	32,51 a
	T2	22,34 c	31,34 a
	T3	23,78 b	31,56 a
	T4	32,09 a	32,09 a
<i>Corymbia citriodora</i>	T1	20,88 c	30,22 b
	T2	22,65 b	29,03 b
	T3	23,28 b	31,05 a
	T4	29,78 a	29,78 b

Nota: T1: madeira carbonizada após um mês de estocagem; T2: madeira carbonizada após dois meses de estocagem; T3: madeira carbonizada após três meses de estocagem; T4: madeira carbonizada na condição anidra. Médias na vertical do mesmo material genético seguidas por mesma letra não diferem pelo teste Tukey a 5%

Para a base úmida, os clones MN 463 e VM 4 apresentaram , maior rendimento após três meses de secagem. Para *C.citriodora*, o rendimento após dois e três meses de secagem foram iguais. Esta espécie perdeu 5,67% de umidade no ultimo mês de secagem, o que não foi suficiente para garantir a diferença de tratamentos Nas condições de campo, toda a energia para evaporação da água e fornecida pela queima do material lenhoso. Nas condições laboratoriais, a mufla supre parte da energia demandada para retirada da água na

madeira, com isso, a diferença entre no rendimento na base seca tende a ser minimizado. Os materiais de *Eucalyptus urophylla* apresentaram maior umidade, o que poderia retardar a carbonização fazendo com que os rendimentos destes materiais fossem maiores. As amostras possuíam diâmetros diferentes, sendo que as amostras de *Corymbia citriodora* apresentaram diâmetro menor que aliada a menor umidade destas amostras promoveram uma carbonização mais intensa, o que poderia explicar o maior rendimento.

A densidade variou entre 0,304 e 0,308 para o clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*), 0,345 e 0,356 para o clone VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) e entre 0,511 e 0,548 para *Corymbia citriodora* (Tabela 21).

Tabela 21 Densidade do carvão após secagem e na condição anidra

Material	Tratamentos	Densidade (g/cm ³)
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	T1	0,306 a
	T2	0,312 a
	T3	0,304 a
	T4	0,308 a
VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	T1	0,345 a
	T2	0,356 a
	T3	0,353 a
	T4	0,352 a
<i>Corymbia citriodora</i>	T1	0,523 a
	T2	0,511 a
	T3	0,548 a
	T4	0,524 a

Nota: T1: madeira carbonizada após um mês de estocagem; T2: madeira carbonizada após dois meses de estocagem; T3: madeira carbonizada após três meses de estocagem; T4: madeira carbonizada na condição anidra. Médias na vertical do mesmo material genético seguidos por mesma letra não diferem pelo teste Tukey a 5%.

A densidade do carvão acompanhou a densidade da madeira, os mesmos materiais carbonizados com diferentes umidades apresentaram densidades semelhantes.

Houve variação entre 18,68 e 26,59 % pra os materiais voláteis, 0,31 e 0,88% para o teor de cinzas, 73,1 e 80,64% para o teor de carbono fixo e entre 7406 e 7754 cal/g para o poder calorífico superior (Tabela 22).

Tabela 22 Análise imediata e poder calorífico superior do carvão produzido após secagem e na condição anidra

Material	Tratamento	Materiais voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Poder calorífico superior (cal/g)
Mn 463 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	T1	24,54 b	0,39 a	75,07 a	7657 a
	T2	24,90 b	0,41 a	74,69 a	7524 a
	T3	26,59 a	0,31 a	73,10 b	7588 a
	T4	24,90 b	0,40 a	74,70 a	7533 a
VM 4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	T1	23,37 a	0,57 b	76,07 c	7754 a
	T2	19,46 c	0,77 a	79,77 a	7645 b
	T3	22,56 ab	0,46 b	76,98 bc	7367 c
	T4	21,56 b	0,48 b	77,96 b	7677 ab
<i>Corymbia citriodora</i>	T1	21,68 a	0,80 a	77,52 b	7476 ab
	T2	18,68 b	0,68 b	80,64 a	7499 ab
	T3	19,88 b	0,50 c	79,62 a	7534 a
	T4	22,78 a	0,88 a	76,34 b	7406 b

Nota: T1: madeira carbonizada após um mês de estocagem; T2: madeira carbonizada após dois meses de estocagem; T3: madeira carbonizada após três meses de estocagem; T4: madeira carbonizada na condição anidra. Médias na vertical do mesmo material genético seguidos por mesma letra não diferem pelo teste Tukey a 5%

A análise da química imediata e do poder calorífico do carvão foi semelhante entre os tratamentos para mesmo material genético. A energia fornecida pela mufla minimizou os efeitos da umidade no processo de carbonização, padronizando o processo, de modo que materiais carbonizados com diferentes umidades resultassem em produtos com mesmas características.

Os materiais do clone Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*) foram carbonizados com maior umidade resultando em menor degradação térmica, fazendo com que este material apresente maior teor de carbono fixo.

As cunhas deste material destinadas à carbonização apresentaram maiores dimensões devido ao maior diâmetro das mesmas, o que pode retardar o processo de carbonização, fazendo com que este material apresente menor teor de carbono fixo, principalmente quando comparado ao *Corymbia citriodora*.

5 CONCLUSÃO

As toras de menor diâmetro apresentaram maior taxa de secagem e menor umidade final, todas as toras do topo apresentaram umidade final semelhantes. Para as toras da base e do meio, as amostras de *Corymbia citriodora* apresentaram menor umidade, seguido pelo VM 4 (*Eucalyptus urophylla*) e por fim o Mn 463 (*Eucalyptus urophylla*).

O tempo de estocagem aumentou o poder calorífico líquido do material devido a redução da umidade da madeira. Com ganho médio de 54% no após 90 dias de secagem.

Entre os parâmetros para produção do carvão, apenas o rendimento gravimétrico na base úmida foi afetado pela secagem.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. O processo de carbonização contínua da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. 393 p.
- ASSIS, P. S.; ALMEIDA, L. Z.; PORTO, F. M. Utilização do carvão vegetal na siderurgia: produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 281-318.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Retatório estatístico 2011/2012**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br>>. Acesso em: 22 fev. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**. 2010. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/>>. Acesso em: 7 jan. 2012.
- BARAÚNA, E. E. M.; OLIVEIRA, V. S. Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e tauarí vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. **Acta amazônica**. Manaus, v. 39, n. 1, p. 91-96, 2009.
- BARROS, M. V. Fator de cubicação para madeira empilhada de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente. 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- BERBEROVIC, A.; MILOTA, M. R. Impact of wood variability on the drying rate at different moisture content levels. **Forest Products Journal**, Madison, v. 61, n. 6, p. 435–442, 2011.
- BOTREL, M. C. G. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **The Science Forum**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, jun. 2010

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

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

BRIANNE, D.; DOAT, J. Guide technique de la carbonisation. Agence Française pour La Maîtrise de l'Énergie - Association Bois de Feu - Centre technique forestier tropical, 1985. 180 p.

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

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. Viçosa, MG: UFV, 1996.

COUTINHO, A. R. **Qualidade do carvão vegetal correlacionada as características da madeira de *Eucalyptus saligna* e temperatura de carbonização**. Piracicaba. 1984. 76 p. Dissertação (Magister Scientiae - MSc) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1984.

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracinga (*Mimosa scabrella* Benth) e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981.14 p.

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

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 339-344, 2010.

HASELEIN, C. R. et al. Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* smith sob o efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 147-152, 2002.

HERMAWAN, A.; FUJIMOTO, N.; SAKAGAMI, H. Effects of high-temperature and low-humidity pretreatment on the drying properties of Sugi boxed-heart timber with black-colored heartwood. **Drying Technology**, New York, v. 30, n. 1, p. 780–786, 2012.

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

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology: solid wood**. New York: Springer, 1968. v. 1, 592 p.

KOLLMANN, F. F. P.; SCHNEIDER, A. Der Einfluss der Belüftungsgeschwindigkeit auf die Trocknung von Schnittholz mit Heissluft-Dampf-Gemischen. **Holz Roh-Werkstoff**, Berlin, v. 13, n. 3, p. 81-94, 1960.

LEMOS, A. L. F. et al. Madeira de *Corymbia citriodora* (hook.) k.d. hill & l.a.s. johnson sob aspectos físicos e anatômicos como fatores qualitativos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 1, p. 1-8, 2012.

MARCOS, F. M. **Otros aprovechamientos forestales**. Madrid: F. Martín Asín, 1997. 62 p.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal**: produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 77-89.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Energia armazenada nos resíduos do desdobro de toras de *Eucalyptus grandis*. **Ciência da Madeira**, v. 3, n. 1, p. 33–42, 2012.

MOYA, R.; TENÓRIO, C.; MEYER, I. Influence of wood anatomy on moisture content, shrinkage and during defects in *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 249-258, 2012.

MUGABI, P. et al. Relationships between drying defect parameters and some growth characteristics in kiln-dried South African grown *Eucalyptus grandis* poles. **European Journal of Wood Products**, New York, v. 68, n. 3, p. 329–340, 2010.

OLIVEIRA, A. C. et al. avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 59 - 68, jan./mar. 2012.

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden)**. 1988. 47 p. (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p. 64-102.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Brasília: Embrapa Florestas, 2000. (Documento, 38).

REZENDE, J. G. **Calor de reação de perólise da madeira**: aplicação aos balanços de massa e energia da carbonização contínua. 1983. 154 p. Dissertação (Master Science) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1983.

REZENDE, R. N. **Secagem de toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão**. 2009. 178 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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

REZENDE, R. N. et al. Air drying of logs from eucalyptus urophylla clone for carbonization use. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 565-572, 2010b.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 2006. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

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

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 99-106, 2002.

SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, jan./mar. 2012.

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

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1971. 245 p.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.

STEINHAGEN, H. P. Effect of kiln air velocity, at various moisture content levels, on drying rate of 4/4 yellow-poplar sapwood. **Forest Prod. J.**, v. 24, n. 4, p. 45-47, 1974.

STREZOV, V. et al. Fundamental aspects of biomass carbonization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 79, p. 91–100, 2007.

SWITHENBANK, J. et al. Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 999-1007, 2011.

TROSSERO, M. A. **Análisis de parámetros de pirólisis de biomassa**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología industrial, 1981.

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

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

VALE, A. T. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALENTE, O. F.; LELLES, A. R. Carbonização da madeira. In: MASSUDA, H. (Ed.). **Carvão e coque aplicados à metalurgia**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979. p. 61-84.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 1, p. 10-27, ago. 1985.

WENGERT, G. Measuring moisture content. **Cabinet Maker**, v. 19, n. 2, p. 26-27, 2005.

WENZL, H. F. J. **The chemical technology of wood**. New York: Academic, 1970. 692 p.