



**ANA ELISA RODARTE BALIZA**

**PRODUTIVIDADE E CARACTERÍSTICAS DA  
MADEIRA DE UM CLONE HÍBRIDO DE  
*Eucalyptus urophylla* PLANTADO EM MINAS  
GERAIS**

**LAVRAS - MG**

**2014**

**ANA ELISA RODARTE BALIZA**

**PRODUTIVIDADE E CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DE UM  
CLONE HÍBRIDO DE *Eucalyptus urophylla* PLANTADO EM MINAS  
GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientadores

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Dr. José Tarcísio Lima

**LAVRAS - MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Baliza, Ana Elisa Rodarte.

Produtividade e características da madeira de um clone híbrido  
de *Eucalyptus urophylla* plantado em Minas Gerais / Ana Elisa  
Rodarte Baliza. – Lavras : UFLA, 2014.

72 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Madeira - Qualidade. 2. Produtividade florestal. 3. Eucalipto.  
4. Energia da biomassa. I. Universidade Federal de Lavras. II.  
Título.

CDD – 662.74

**ANA ELISA RODARTE BALIZA**

**PRODUTIVIDADE E CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DE UM  
CLONE HÍBRIDO DE *Eucalyptus urophylla* PLANTADO EM MINAS  
GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2014.

Dr. Paulo Fernando Trugilho

UFLA

Dr. José Tarcísio Lima

UFLA

Dra. Vássia Carvalho Soares

IFMG

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Orientador

**LAVRAS - MG**

**2014**

## RESUMO

Objetivou-se neste estudo avaliar o efeito da idade e do sítio nas características de crescimento das árvores, da madeira e de produção de volume e biomassa de *Eucalyptus* para fins energéticos, além do ajuste de equações para predição das características analisadas em função da idade e do ajuste de equações para determinar os valores de produção a partir das variáveis DAP e altura. Para a realização deste estudo foi utilizada a madeira do clone GG 100, híbrido natural obtido a partir do cruzamento do *Eucalyptus urophylla*, proveniente de sítios florestais localizados no município de Três Marias - MG. O espaçamento de plantio do clone foi de 3,0 m x 3,0 m e as árvores avaliadas apresentavam diferentes idades: quatro, cinco, seis, sete, oito e nove anos. Para avaliar a capacidade produtiva dos diferentes sítios foi determinado o índice de sítio a partir dos valores de altura dominante e codominante obtidos no campo. Para a avaliação das características de crescimento das árvores, da madeira e de produção foi amostrada uma árvore por sítio, o que totalizou em trinta e uma árvores amostradas. Nas árvores amostradas foram mensurados o DAP e a altura total e comercial. Posteriormente, para a realização das análises químicas, físicas e energéticas desempenhadas no Laboratório de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras e para a determinação dos valores de produção, foram retirados discos com espessura de 2,5 cm, em 5 posições longitudinais relativas - 2%, 10%, 30%, 50% e 70% - da altura comercial das árvores, além de um disco adicional no DAP. Foram ajustadas equações para a estimativa das características avaliadas a partir da idade das árvores e equações para estimar os valores de produção pelas variáveis DAP e altura. Os resultados indicaram que possivelmente houve interferência do sítio nos valores de nitrogênio, extrativos e cinzas e nas características de crescimento e de produção. A idade, porém, afetou a altura, a densidade básica, a densidade energética, o teor de lignina, de extrativos, de cinzas e as produções totais. As equações ajustadas para avaliar o efeito da idade nas diversas características analisadas apresentaram altos coeficientes de determinação e a distribuição gráfica de resíduos indicou a presença de dados pouco discrepantes. As equações ajustadas para determinar os valores de produção em função do DAP e da altura também apresentaram qualidade satisfatória, o que pode ser constatado pelos altos coeficientes de determinação obtidos e pela distribuição gráfica dos resíduos.

Palavras-chave: Qualidade da madeira. Produtividade florestal. Eucalipto. Energia da biomassa.

## ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the effect of age and site on growth characteristics of trees, timber and volume production and biomass of *Eucalyptus* for energy purposes, beyond the different equations for predicting the characteristics analyzed in function of age and adjusting equation to determine the production values from DBH and height variables. For this study the timber of the clone GG 100, natural hybrid obtained from crossing of *Eucalyptus urophylla*, derived from forest sites located in the *Três Marias* - MG city. The spacing of planting the clone was 3.0 m x 3.0 m and the trees evaluated had different ages: four, five, six, seven, eight and nine years. To evaluate the productive capacity of different sites was determined the site index from dominant and codominant height values obtained in the field. For the evaluation of the tree growth characteristics, timber and production was sampled one tree per site, which amounted to thirty-one sampled trees. In the sampled trees were measured DBH and total and commercial height. Subsequently, to the achievement of chemical, physical and energetic analysis performed at the Biomaterials' Laboratory of the Federal University of Lavras and to determine the production values, disks with a thickness 2.5 cm were removed in five longitudinal relative positions - 2%, 10%, 30%, 50% and 70% - from commercial height of the trees, plus an additional disk in DBH. Equations were fitted to estimate characteristics examined from the age of the trees and equations to estimate the production values by DBH and height variables. The results indicated that there was possibly interference of the site in the values of nitrogen, extractives and ash on growth characteristics and production. The age, however, affect the height, basic density, energy density, lignin content, extractives, ash and total yield. The adjusted equations to evaluate the age effect on several characteristics analyzed showed high coefficients of determination and the residuals graphical distribution indicated the data presence slightly discrepant. The adjusted equations to determine the production values in function of DBH and height also showed satisfactory quality, which can be evidenced by the high determination coefficients obtained and by the residuals graphical distribution.

**Keywords:** Timber quality. Forest productivity. *Eucalyptus*. Biomass energy.

*A Deus, aos meus pais e ao meu irmão,*

***DEDICO***

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por permitir minha existência.

Aos meus pais, Murilo e Mônica, pelo amor incondicional.

Ao meu irmão, Murilinho, por todo amor e carinho dedicado a mim.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela formação acadêmica.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho, pela dedicação, orientação, ensinamentos e por toda a ajuda prestada para que este trabalho se tornasse possível.

A todos os professores, técnicos e funcionários do curso de Engenharia Florestal da UFLA.

Ao Abner por se fazer presente em todos os momentos deste trabalho, pelo carinho e pela dedicação.

Aos amigos Vivian, Luana, Raphael, Jeimy, Altobelly, Luís Eduardo, Thiago, Claudinéia, Allan e Ana Clara e aos demais alunos do curso pelo convívio, ajuda e momentos de descontração.

Ao Luiz, pela ajuda nos ensaios laboratoriais.

À Gerdau Florestal S.A., pela concessão do material de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela ajuda financeira prestada.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.



## SUMÁRIO

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 10 |
| <b>2</b>       | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | 12 |
| <b>2.1</b>     | <b>A biomassa florestal como fonte energética</b> .....   | 12 |
| <b>2.2</b>     | <b>O gênero <i>Eucalyptus</i></b> .....   | 13 |
| <b>2.3</b>     | <b>Produção e avaliação da qualidade da madeira em função da idade e do sítio para fins energéticos</b> ..... | 14 |
| <b>2.3.1</b>   | <b>Avaliação energética da madeira</b> .....  | 15 |
| <b>2.3.1.1</b> | <b>Constituintes químicos presentes na madeira</b> .....  | 15 |
| <b>2.3.1.2</b> | <b>Densidade básica</b> .....   | 15 |
| <b>2.3.1.3</b> | <b>Poder calorífico superior e inferior</b> .....   | 16 |
| <b>2.3.2</b>   | <b>Sítios florestais</b> .....  | 16 |
| <b>2.3.3</b>   | <b>Classificação de sítio</b> .....   | 17 |
| <b>2.3.4</b>   | <b>Sítio x qualidade da madeira</b> .....   | 18 |
| <b>2.3.5</b>   | <b>A idade</b> .....  | 19 |
| <b>2.3.6</b>   | <b>Madeira juvenil</b> .....  | 19 |
| <b>3</b>       | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....   | 21 |
| <b>3.1</b>     | <b>Material genético e local de coleta</b> .....  | 21 |
| <b>3.2</b>     | <b>Seleção e amostragem das árvores</b> .....   | 21 |
| <b>3.3</b>     | <b>Determinação do índice de sítio</b> .....  | 22 |
| <b>3.4</b>     | <b>Características de crescimento: determinação do diâmetro e altura das árvores</b> .....                    | 22 |
| <b>3.5</b>     | <b>Características avaliadas na madeira</b> .....   | 23 |
| <b>3.5.1</b>   | <b>Amostragem dos materiais</b> .....   | 23 |
| <b>3.5.2</b>   | <b>Determinação da densidade básica</b> .....   | 24 |
| <b>3.5.3</b>   | <b>Análise elementar</b> .....  | 25 |
| <b>3.5.4</b>   | <b>Análise química</b> .....  | 25 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.5.5 | Poder calorífico superior e inferior.....                          | 26 |
| 3.5.6 | Densidade energética.....  | 27 |
| 3.6   | Características de produção da madeira.....                        | 27 |
| 3.6.1 | Volume individual das árvores e volume por hectare.....            | 27 |
| 3.6.2 | Incremento médio anual volumétrico.....                            | 28 |
| 3.6.3 | Incremento médio anual em massa seca das árvores.....              | 28 |
| 3.6.4 | Incremento médio anual elementar.....                              | 29 |
| 3.6.5 | Incremento médio anual molecular e polimérico.....                 | 29 |
| 3.6.6 | Produção de massa seca total.....                                  | 30 |
| 3.6.7 | Produção elementar.....  | 30 |
| 3.6.8 | Produção dos constituintes químicos moleculares e poliméricos..... | 31 |
| 3.7   | Análise estatística.....   | 31 |
| 4     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                | 33 |
| 4.1   | Valores de índice de sítio determinados.....                       | 33 |
| 4.2   | Características de crescimento.....                                | 35 |
| 4.3   | Características da madeira.....                                    | 37 |
| 4.3.1 | Densidade básica.....  | 37 |
| 4.3.2 | Análise elementar.....   | 40 |
| 4.3.3 | Análise química.....   | 42 |
| 4.3.4 | Poder calorífico e densidade energética.....                       | 47 |
| 4.4   | Características de produção.....                                   | 49 |
| 4.5   | Predição da massa seca a partir dos valores de DAP e altura.....   | 60 |
| 5     | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 65 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 66 |

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação da madeira e das características de produção de plantios florestais é de grande importância na definição do potencial de espécies madeireiras para determinado uso final. A partir dessa avaliação é possível quantificar a produção volumétrica e de matéria seca produzida pelos plantios e determinar as propriedades químicas, físicas, anatômicas e mecânicas da madeira.

As variações referentes à produtividade e a qualidade da madeira das árvores são influenciadas, em grande parte, por características relativas à genética das árvores. Porém, ainda assim, a localização e o espaçamento de plantio, as práticas de manejo, a idade de corte, entre outros, constituem fatores que alteram a qualidade da madeira, o volume e a quantidade de massa produzida por planta e por unidade de área.

Dentre os fatores que exercem influência nos valores de produção e na qualidade da madeira para fins energéticos, a idade é um dos elementos que merece destaque, já que, segundo diversos pesquisadores, o estágio de desenvolvimento da planta interfere nos valores de lignina, de densidade básica, de produção de matéria seca e de outras variáveis que são importantes na definição de espécies madeireiras para esse setor (BILLA et al., 2000). O sítio também é outro fator que merece ser evidenciado, pois, normalmente, quanto maior é a capacidade produtiva dos sítios, maior é a produtividade esperada. A qualidade da madeira também é afetada pelo ambiente de plantio, porém, estudos sobre a qualidade da madeira em diferentes sítios ainda necessitam ser realizados com maior intensidade.

Pelo exposto, este trabalho consistiu em analisar o efeito do sítio e da idade nas características de crescimento das árvores, da madeira e de produção de volume e biomassa de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* destinado

para fins energéticos. Além disso, também se objetivou ajustar equações para predição das características analisadas em função da idade e ajustar equações para determinar os valores de produção a partir das variáveis DAP e altura.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 A biomassa florestal como fonte energética**

Do ponto de vista energético, biomassa é todo material orgânico utilizado como combustível. Dentro dessa definição, a biomassa não se refere somente à madeira. A abrangência de materiais que constituem a biomassa é extensa e compreende, além da madeira, grãos, frutos, resíduos florestais, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, entre outros.

O uso da lenha extraída de vegetações nativas e de plantios comerciais como fonte energética, é a forma mais tradicional de obtenção de energia proveniente da biomassa. Desde os primórdios, o homem utiliza a madeira como fonte de energia e, hoje, sua utilização está normalmente vinculada com produtos secundários, como por exemplo, o carvão vegetal.

Plantios energéticos são bastante comuns no Brasil, principalmente no estado de Minas Gerais, onde o carvão vegetal é amplamente utilizado como termorreductor pela indústria siderúrgica, pois ele fornece a energia e o reductor para a conversão do minério de ferro em ferro gusa, intermediário final para a produção de aço e outros materiais.

O carvão vegetal, além de ser utilizado pela indústria siderúrgica, é também utilizado para cocção de alimentos, em lareiras, para fabricação de cimento, cerâmica, ou ainda pode ser ativado e utilizado na indústria química e farmacêutica, entre outros (BRAND, 2010).

A madeira como fonte energética, pode ainda ser convertida em outros combustíveis, utilizando tecnologias e processos complexos de conversão. Essas formas, ainda menos comuns, são bastante promissoras. A gaseificação é realizada, normalmente, para a geração de um gás, que pode ser utilizado na síntese orgânica para produção de metanol e amônia, além da geração de vapor

para a produção de energia elétrica. Outro processo, a hidrólise ácida ou enzimática, visa à produção de etanol.

## **2.2 O gênero *Eucalyptus***

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae e possui como centro de origem a Austrália e regiões próximas como Timor, Indonésia, Papua Nova Guiné, Molucas, Irian Jaya e sul das Filipinas (ELDRIDGE et al., 1993). As espécies variam de arbustos a árvores de grande porte, possuindo uma diversidade considerável de utilizações, como por exemplo, no processamento da madeira para a construção civil e fabricação de móveis, para a indústria do papel e para a produção de energia.

Determinadas espécies do gênero *Eucalyptus* adaptaram-se muito bem ao Brasil devido à ampla plasticidade das espécies para variados ambientes, e graças à avançada tecnologia silvicultural e clonal brasileira, a produção de madeira no país é, no mínimo, dez vezes maior que a de muitos países de clima temperado (VALVERDE et al., 2004), sendo ainda o processo de extração da madeira no campo realizado em um curto espaço de tempo. Vale lembrar também que várias espécies desse gênero são tolerantes a diferentes ambientes, à acidez do solo e à baixa fertilidade (ROCKWOOD et al., 2008).

Sendo assim, atualmente o eucalipto tem suprido em grande parte a demanda de matéria-prima utilizada pelas indústrias brasileiras de base florestal. Segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013), a área de plantios de eucalipto no Brasil totaliza mais de 5,1 milhões de hectares.

O uso da madeira de eucalipto para geração de energia tem sido historicamente relacionado à produção de carvão vegetal tanto para consumo residencial, industrial e agropecuário (SANTOS, R. C. et al., 2012) quanto para

a utilização como lenha. Porém, a madeira de eucalipto pode ainda ser convertida em diversas outras formas úteis de energia, utilizando diferentes processos de conversão (MCKENDRY, 2002).

### **2.3 Produção e avaliação da qualidade da madeira em função da idade e do sítio para fins energéticos**

A quantificação do volume de madeira produzida por indivíduo e por unidade de área constitui um dos aspectos fundamentais na caracterização do potencial de espécies madeireiras para determinada finalidade (SANTANA, 2009).

Entretanto, segundo Trugilho (2009), cada vez mais os estudos relacionados à produção de madeira para geração de energia, estão objetivando analisar não somente a produção volumétrica, mas também a produção em massa seca e conseqüentemente a produtividade energética dos plantios.

Porém, para analisar o potencial das plantações florestais para fins energéticos é necessário não apenas avaliar a quantidade de volume e massa produzida por unidade de área, mas também, a qualidade da madeira proveniente desses plantios. Sendo assim, quantidade e qualidade não devem ser tratadas como fatores independentes.

A qualidade da madeira e a produtividade em plantios florestais para fins energéticos são, dentre outros fatores, determinadas pela genética das árvores, pelo espaçamento de plantio adotado, pelo sítio, pelas práticas silviculturais e pela idade de corte das árvores.

### **2.3.1 Avaliação energética da madeira**

Na avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos é importante o conhecimento de sua composição química, densidade básica, poder calorífico superior e inferior, entre outros fatores a serem considerados.

#### **2.3.1.1 Constituintes químicos presentes na madeira**

Os principais elementos químicos presentes na madeira são: o carbono, o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio e o enxofre. A partir da união desses elementos químicos, controlada por redes de biossíntese de moléculas que se interagem, são formadas estruturas supramoleculares e poliméricas (RUEL et al., 2006). As principais macromoléculas, moléculas e polímeros presentes na madeira são: a celulose, as hemiceluloses, a lignina e os extrativos. Quando a madeira é destinada para fins energéticos o desejável é que ela apresente alta porcentagem em carbono, hidrogênio, lignina e alguns tipos de extrativos. Porém, também são desejáveis menores quantidades de oxigênio, nitrogênio, enxofre e minerais.

#### **2.3.1.2 Densidade básica**

A densidade básica expressa a relação entre a massa de madeira seca pelo respectivo volume de madeira no estado verde ou saturado.

Quando a biomassa é utilizada para fins energéticos, a densidade básica tem grande importância, visto que ela expressa a quantidade de massa de madeira, sem a influência da umidade, capaz de gerar energia (BRAND, 2010). A densidade básica também influencia vários processos e produtos da



transformação/conversão energética da madeira, além de estar relacionada diretamente com outras características da madeira.

### **2.3.1.3 Poder calorífico superior e inferior**

O poder calorífico é uma característica de grande importância na caracterização da madeira como fonte energética. Entende-se como poder calorífico de um dado material a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível.

Existem dois valores calóricos a serem considerados: o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior. O poder calorífico superior é definido como a quantidade de calor gerado pela combustão completa do combustível, em uma bomba calorimétrica, assumindo-se que tanto a água contida na amostra como a que é formada a partir do hidrogênio combinado com o oxigênio do ar permanecem no estado líquido. Já, o poder calorífico inferior é calculado quando se assume que a água formada pelo processo de combustão permanece sob a forma de vapor (NÚÑEZ-REGUEIRA; AÑÓN; CASTIÑEIRAS, 1996), sendo este o calor latente do vapor-d'água perdido pelo sistema.

### **2.3.2 Sítios florestais**

O sítio florestal é definido na maioria das vezes sob dois pontos de vista: como uma unidade geográfica uniforme, caracterizada por certa combinação estável dos fatores do meio e na qual se pode esperar o desenvolvimento de uma cobertura vegetal mais ou menos homogênea (SPURR; BARNES, 1980); ou segundo diversos manejadores florestais, como a capacidade produtiva de uma área florestal influenciada por fatores do ambiente (SCHONAU, 1987).

Diversos autores afirmam, porém, que esses dois conceitos são complementares e que a definição de sítio sob a ótica ecológica auxilia na determinação da qualidade dos sítios mensurada a partir de fatores de produção.

Segundo Scolforo (1998) a determinação da qualidade do sítio florestal é uma prática comum para classificar povoamentos equiâneos, pois a qualidade do sítio afeta as variáveis dendrométricas comumente medidas em uma floresta, como por exemplo: o diâmetro, a altura, a área basal e o volume. Sendo que, de maneira geral, essas variáveis aumentam quanto mais forem produtivos os sítios.

### **2.3.3 Classificação de sítio**

Basicamente, existem dois métodos para a classificação da capacidade produtiva ou qualidade do sítio florestal, o direto e o indireto. O método direto avalia o crescimento das árvores em um determinado sítio, por meio de medições das variáveis dendrométricas: volume, área basal ou altura (CARMEAN, 1975; SPURR, 1952). Já o método indireto é aquele baseado nas características ecológicas do sítio. Porém, essa classificação pode ainda ser desenvolvida a partir da associação desses dois fatores.

Dentre as variáveis dendrométricas utilizadas na classificação de sítios florestais, a altura dominante ou dominante e codominante são as mais recomendadas, já que essas características são pouco afetadas pelo espaçamento de plantio, enquanto o volume e a área basal sofrem bastante influência da densidade do povoamento e de práticas de manejo (SCOLFORO, 2006).

A avaliação da qualidade dos sítios é realizada por meio da variável altura dominante ou dominante e codominante, normalmente, a partir dos “índices de sítio”. O valor do índice de sítio de um determinado local representa em prática a expectativa do desenvolvimento em altura, a qual o povoamento terá na idade de referência, normalmente, a idade de rotação (CLUTTER, 1983).

Sendo que quanto maior for esse valor, maior será a capacidade produtiva do mesmo.

#### **2.3.4 Sítio x qualidade da madeira**

A qualidade dos sítios florestais, além de influenciar na capacidade produtiva das árvores, interfere também na qualidade da madeira. Schultz (1997), por exemplo, relatou que as características dos sítios afetaram a densidade básica da madeira, sendo que a madeira das árvores provenientes de sítios mais produtivos apresentou menor densidade básica quando comparada a madeira das árvores provenientes de sítios de menor produtividade. Oliveira et al. (2012), em estudo comparativo da densidade da madeira de diversas espécies em diferentes locais, também observaram que houve um gradiente crescente de indivíduos de maior densidade à medida que os ambientes se tornaram mais adversos à atividade fisiológica das plantas.

Silva (2011) afirma, porém, que a tendência de diminuição da densidade básica com o aumento da capacidade produtiva dos sítios não é uma realidade absoluta, pois há muitas espécies e clones que apresentam alta densidade em sítios de alta produtividade. Quilhó e Pereira (2001), por exemplo, em estudos com a madeira de *E. globulus* em diferentes locais, constataram que no melhor local foi encontrado o maior valor de densidade básica.

Apesar de diversos estudos que relacionam a densidade da madeira em função do ambiente já terem sido realizados, estudos que demonstram a relação dos componentes químicos entre sítios produtivos e não produtivos são poucos e ainda pouco conclusivos. Biermann (1996), em estudo comparativo entre a qualidade da madeira em diferentes sítios, relatou que as árvores que possuíam crescimento mais lento, ou seja, que se desenvolviam em sítios pouco produtivos

apresentaram menor teor de lignina na composição da madeira em comparação ao apresentado na madeira presente nos sítios mais produtivos.

### **2.3.5 A idade**

Entre os critérios para avaliação da produtividade de espécies florestais para fins energéticos, a idade de corte é um fator importante, pois a idade exerce influência nos ganhos de produção em volume e em massa seca. Além disso, a idade influencia também na qualidade da madeira.

As alterações na qualidade da madeira em função da idade em florestas energéticas, caracterizadas como florestas de curta rotação e de rápido crescimento, são determinadas pela presença da madeira juvenil e sua proporção no tronco.

### **2.3.6 Madeira juvenil**

A madeira juvenil corresponde ao xilema secundário, formado durante a fase jovem do câmbio vascular da árvore, nos estágios iniciais do seu crescimento (SMITH; BRIGGS, 1986). Nessa fase ocorre uma rápida elevação nas dimensões e mudanças correspondentes na forma, estrutura e disposição das células nas sucessivas camadas de crescimento, até que se atinja durante a maturidade valores que se mantêm, aproximadamente, constantes (JANKOWSKY, 1979). Essa variação, que aparece radialmente ao longo do tronco, pode ser explicada devido ao fato de que no lenho juvenil o câmbio se encontra ainda fisiologicamente imaturo e em último caso, pela produção hormonal (LARSON, 1973).

Em algumas espécies e indivíduos, a formação de madeira juvenil estende-se por vários anos, enquanto em outras a formação de madeira adulta

inicia-se mais cedo (PALMA; LEONELLO; BALLARIN, 2010). Segundo Jankowsky (1979), para *Pinus taeda* varia entre sete e onze anos na sua região de origem, sendo que no Brasil, estudos preliminares sugerem que a madeira atinge a maturidade após o oitavo ano. Para *Pinus radiata*, em plantios comerciais na Austrália, o período de juvenilidade está entre doze e quinze anos e, no caso de alguns *Eucalyptus*, pode ser superior a vinte anos.

Segundo Ballarin e Nogueira (2005), a madeira juvenil ocorre desde o topo até a base da árvore, sendo essa região semelhante a um cilindro localizado no centro da planta, em que a ponta do tronco é constituída principalmente por lenho juvenil. Ainda de acordo com o mesmo autor, as proporções relativas entre madeira juvenil e adulta variam de acordo com a idade da árvore, sendo que, por exemplo, árvores de eucalipto de rápido crescimento, cujo ciclo de rotação é de aproximadamente sete anos, apresentam quase que, predominantemente ao longo do tronco, lenho juvenil.

A madeira juvenil, de forma geral, caracteriza-se por apresentar menor densidade, maior ângulo das microfibrilas na camada S2 da parede celular, células mais curtas, maior proporção de lenho de reação, menor porcentagem de lenho tardio, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemiceluloses e menor conteúdo de celulose, em relação à madeira adulta (BENDTSEN, 1978; SENFT; BENDTSEN; GALLIGAN, 1985; ZOBEL, 1984).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material genético e local de coleta

Foi avaliada neste estudo a madeira do clone GG 100, híbrido natural obtido a partir do cruzamento do *Eucalyptus urophylla*, proveniente de plantios pertencentes à empresa Gerdau Florestal S.A., localizada no município de Três Marias, região central do estado de Minas Gerais.

O espaçamento de plantio adotado foi de 3,0 m x 3,0 m, ou seja, 1.111 plantas/ha. Sendo que, as árvores avaliadas apresentavam diferentes idades (quatro, cinco, seis, sete, oito e nove anos).

#### 3.2 Seleção e amostragem das árvores

As áreas de coleta das árvores amostradas na região de Três Marias foram provenientes de trinta e um sítios florestais. Os diferentes sítios representaram diferentes parcelas localizadas em determinados talhões presentes em fazendas da empresa.

Foi amostrada uma árvore por sítio. A distribuição do número de árvores amostradas por idade está representada na Tabela 1.

Tabela 1 Número de árvores amostradas por idade

| Idade | Número de árvores amostradas |
|-------|------------------------------|
| 4     | 4                            |
| 5     | 6                            |
| 6     | 4                            |
| 7     | 6                            |
| 8     | 6                            |
| 9     | 5                            |
| Total | 31                           |

A seleção da árvore amostrada em cada sítio foi baseada na aproximação do DAP (diâmetro à altura do peito - 1,30 m de altura do solo), com o DAP médio da parcela amostrada e também se evitou escolher árvores localizadas próximas à bordadura das parcelas.

### 3.3 Determinação do índice de sítio

O índice de sítio foi determinado de acordo com a Equação 1. Os dados de altura dominante e codominante por sítio analisado foram obtidos a partir do inventário florestal da empresa.

$$S = \frac{\overline{\text{HDC}} \left( 1 + \exp \left( \frac{32 - I}{11} \right) \right)}{1 + \exp \left( \frac{32 - I_{\text{ref}}}{11} \right)} + \varepsilon_i \quad (1)$$

em que,  $S$  é o índice de sítio (m);  $\overline{\text{HDC}}$  é a altura média dominante e codominante (m);  $I$  é a idade (meses);  $I_{\text{ref}}$  é a idade de referência, nesse caso adotou-se a idade de 72 meses; 32 e 11 são os parâmetros ajustados;  $\varepsilon_i$  é a variável erro.

### 3.4 Características de crescimento: determinação do diâmetro e altura das árvores

Nas árvores amostradas foram mensurados os diâmetros sem casca a 1,30 m de altura do solo (diâmetro à altura do peito - DAP), a altura total e comercial do fuste, considerada até um diâmetro sem casca de aproximadamente

4,0 cm. O DAP foi medido com auxílio de uma fita diamétrica, enquanto que as alturas, total e comercial, foram determinadas por uma trena após o corte das árvores.

### 3.5 Características avaliadas na madeira

As seguintes características foram analisadas na avaliação da qualidade da madeira para produção de energia: a densidade básica, o poder calorífico superior e inferior, a densidade energética e a constituição elementar, molecular e polimérica da madeira das árvores amostradas.

#### 3.5.1 Amostragem dos materiais

A amostragem foi realizada pela remoção de discos com espessura de 2,5 cm, em 5 posições longitudinais relativas - 2%, 10%, 30%, 50% e 70% - da altura comercial das árvores (Figura 1), além de um disco adicional no DAP.

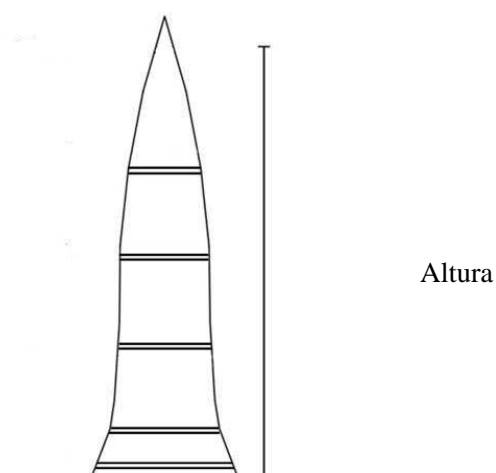


Figura 1 Posições longitudinais de amostragem das árvores



Os discos foram devidamente identificados e levados ao Laboratório de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras para efetuar a retirada, de cada disco, quatro amostras em forma de cunhas, passando-se pela medula. Foram destinadas duas cunhas opostas para a determinação da densidade básica e as restantes para as análises químicas e energéticas da madeira.

A densidade básica foi determinada em todos os discos retirados das árvores. As análises químicas e energéticas, porém, foram determinadas a partir de uma amostragem composta das cinco posições relativas de amostragem, desconsiderando a posição do DAP.

### **3.5.2 Determinação da densidade básica**

A densidade básica da madeira foi obtida pelo método hidrostático, segundo a metodologia descrita na NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

Para o cálculo da densidade básica, foi utilizada a Equação 2.

$$Db = Ms / V_{sat} \quad (2)$$

em que,  $Db$  é a densidade básica ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $Ms$  é a massa seca (g);  $V_{sat}$  é o volume verde ou saturado ( $\text{cm}^3$ ).

Além da determinação da densidade básica no DAP ( $Db_{DAP}$ ), a densidade básica média da madeira das árvores foi determinada a partir da média aritmética das cinco posições relativas de amostragem longitudinal do tronco das árvores ( $Db_{média}$ ).

### 3.5.3 Análise elementar

Foi determinado por meio da análise elementar o teor de carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio presente na madeira das árvores amostradas.

Para a realização dessa análise, os materiais foram moídos em moinho de facas tipo Willey, peneirados e a alíquota utilizada foi retida entre as peneiras de 200-270 mesh. Após peneiramento, o material foi seco em estufa convencional à temperatura de  $103 \pm 2$  °C até massa constante. Posteriormente, foi determinada a porcentagem presente de cada componente químico a partir do analisador universal da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube, conforme realizado por Paula et al. (2011). O teor de oxigênio foi determinado por diferença.

### 3.5.4 Análise química

Foi determinada, a partir da análise química, a porcentagem de holocelulose (celulose + hemiceluloses), lignina, extrativos totais e cinzas presente na madeira das árvores analisadas. Após o processamento dos materiais, as amostras peneiradas foram classificadas em um jogo de peneiras sobrepostas, sendo utilizado o percentual que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em câmara climática, para homogeneização da umidade.

Para a determinação do teor de lignina insolúvel (Klason), o procedimento utilizado foi o proposto por Gomide e Demuner (1986). A metodologia proposta por Goldschimid (1971) foi utilizada para obter o teor de lignina solúvel (Klason) em ácido sulfúrico. A partir da soma do teor de lignina insolúvel com o teor de lignina solúvel foi obtido o teor de lignina total.

Para a determinação do teor de extrativos e de cinzas foram utilizadas as normas M3/89 e M11/77 da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel - ABTCP (1974), respectivamente.

O teor de holocelulose foi obtido a partir da diferença entre todos os constituintes químicos, de acordo com a Equação 3.

$$\text{Holo}(\%) = 100 - \text{Ext}(\%) - \text{Lig}(\%) - \text{Cz}(\%) \quad (3)$$

em que, Holo é o teor de holocelulose; Ext é o teor de extrativos totais; Lig é o teor de lignina; Cz é o teor de cinzas.

### 3.5.5 Poder calorífico superior e inferior

Para a determinação do poder calorífico superior da madeira, as amostras foram peneiradas e foi utilizado o percentual que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa convencional à temperatura de  $103 \pm 2$  °C até massa constante.

O poder calorífico superior foi determinado em calorímetro adiabático, de acordo com a Norma 8633 da ABNT (1983).

O poder calorífico inferior foi obtido pela Equação 4, conforme indicação de Brand (2010).

$$\text{PCI} = \text{PCS} - (6 \times 9 \times \text{H}) \quad (4)$$

em que, PCI é o poder calorífico inferior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ); PCS é o poder calorífico superior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ); H é o teor de hidrogênio (%).

### 3.5.6 Densidade energética

A densidade energética que está relacionada à energia contida em um determinado volume de madeira foi calculada segundo a Equação 5.

$$DE = PCS \times Db_{\text{média}}/1000 \quad (5)$$

em que, DE é a densidade energética ( $\text{Gcal.m}^{-3}$ ); PCS é o poder calorífico superior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ );  $Db_{\text{média}}$  é a densidade básica média calculada levando-se em consideração as cinco posições longitudinais de amostragem ( $\text{g.cm}^{-3}$ ).

## 3.6 Características de produção da madeira

As características de produção avaliadas neste trabalho foram: o volume individual das árvores e o volume por hectare, o incremento médio anual volumétrico, o incremento médio anual e a produção em massa seca do lenho das árvores (incremento e produção total, elementar, molecular e polimérica).

### 3.6.1 Volume individual das árvores e volume por hectare

A determinação do volume individual de madeira sem casca, fornecido pela empresa Gerdau Florestal S.A., foi realizada conforme a Equação 6.

$$V_i = (\pi \times (\text{DAP}^2)/40000) \times \text{Ht} \times \text{ff} \quad (6)$$

em que,  $V_i$  é o volume individual sem casca das árvores ( $\text{m}^3$ ); DAP é o diâmetro sem casca das árvores à altura do peito (cm) Ht é a altura total (m); ff é o fator de forma.

A aferição do volume de madeira sem casca por hectare para cada sítio analisado foi determinada a partir do produto do volume individual verificado para a árvore analisada no sítio n por 1.111 (quantidade de árvores por hectare) - Equação 7.

$$\text{Vol} = V_i \times 1.111 \quad (7)$$

em que, Vol é o volume produzido de madeira sem casca ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $V_i$  é o volume individual sem casca das árvores ( $\text{m}^3$ ).

### 3.6.2 Incremento médio anual volumétrico

O incremento médio anual volumétrico sem casca ( $\text{IMA}_{\text{vol}}$ ) foi determinado a partir da equação 8.

$$\text{IMA}_{\text{vol}} = \text{Vol} / I \quad (8)$$

em que,  $\text{IMA}_{\text{vol}}$  é o incremento médio anual volumétrico ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ); Vol é o volume produzido de madeira sem casca ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ); I é a idade das árvores analisadas (anos).

### 3.6.3 Incremento médio anual em massa seca das árvores

A determinação de massa seca de madeira produzida por hectare por ano foi realizada a partir das Equações 9 e 10.

$$\text{MsDb}_{\text{média}} = \text{Db}_{\text{média}} \times \text{IMA}_{\text{vol}} \times 1000 \quad (9)$$

$$MsDb_{DAP} = Db_{DAP} \times IMA_{vol} \times 1000 \quad (10)$$

em que,  $MsDb_{média}$  é o incremento em massa seca de madeira calculado com base da densidade básica média ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ );  $MsDb_{DAP}$  é o incremento em massa seca de madeira calculado com base na densidade básica medida na altura do DAP ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ );  $Db_{média}$  é a densidade básica média da madeira determinada a partir das cinco posições longitudinais de amostragem ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $Db_{DAP}$  é a densidade básica da madeira medida na altura do DAP ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $IMA_{vol}$  é o incremento médio anual volumétrico ( $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ).

### 3.6.4 Incremento médio anual elementar

O incremento médio anual elementar em massa seca foi determinado a partir da Equação 11.

$$IMA_x = MsDb_{média} \times E / 100 \quad (11)$$

em que,  $IMA_x$  é o incremento em massa do elemento X - nitrogênio, carbono, hidrogênio ou oxigênio ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ );  $MsDb_{média}$  é o incremento em massa seca de madeira calculado com base da densidade básica média ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); E é a porcentagem do elemento X presente na madeira (%).

### 3.6.5 Incremento médio anual molecular e polimérico

O incremento médio anual molecular e polimérico em massa seca foi determinado pela Equação 12.

$$IMA_Y = MsDb_{média} \times C / 100 \quad (12)$$

em que,  $IMA_Y$  é o incremento em massa do composto Y - lignina, extrativos, cinzas ou holocelulose ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ );  $MsDb_{\text{média}}$  é o incremento em massa seca de madeira calculado com base da densidade básica média ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ); C é a porcentagem do composto Y presente na madeira (%).

### 3.6.6 Produção de massa seca total

A determinação da produção de massa seca por hectare foi realizada pela Equação 13.

$$\text{Prod}_{\text{MS}} = \text{MsDb}_{\text{média}} \times I \quad (13)$$

em que,  $\text{Prod}_{\text{MS}}$  é a massa seca de madeira ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $MsDb_{\text{média}}$  é o incremento em massa seca calculado com base da densidade básica média ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ); I é a idade do plantio (anos).

### 3.6.7 Produção elementar

A produção elementar em massa seca foi determinada pela Equação 14.

$$\text{Prod}_X = \text{IMA}_X \times I \quad (14)$$

em que,  $\text{Prod}_X$  é a massa seca do elemento X - nitrogênio, carbono, hidrogênio ou oxigênio ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $\text{IMA}_X$  é o incremento em massa do elemento X - nitrogênio, carbono, hidrogênio ou oxigênio ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ); I é a idade do plantio (anos).

### 3.6.8 Produção dos constituintes químicos moleculares e poliméricos

A produção dos compostos químicos foi determinada pela Equação 15.

$$\text{Prod}_Y = \text{IMA}_Y \times I \quad (15)$$

em que,  $\text{Prod}_Y$  é a massa seca do composto Y - lignina, extrativos, cinzas ou holocelulose ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $\text{IMA}_Y$  é o incremento em massa do composto Y - lignina, extrativos, cinzas ou holocelulose ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ); I é a idade do plantio (anos).

### 3.7 Análise estatística

Na avaliação do experimento foi adotado o delineamento inteiramente casualizado, em que foi considerado como tratamento o efeito da idade do material genético.

Para as características que apresentaram efeito significativo da idade, foram ajustadas equações a partir de modelos lineares simples para verificar a relação funcional existente entre a idade e essas características.

Além disso, foram testados modelos lineares múltiplos para a estimativa dos dados de produção em função do DAP e da altura das árvores. Foi testado também o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) em sua forma linear - Equação 16 - para estimar os valores de produção em função dessas mesmas variáveis.

$$\text{Ln}(Y) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(\text{DAP}) + \beta_2 \text{Ln}(\text{Ht}) + \varepsilon \quad (16)$$

em que, Y é a variável a ser estimada; DAP é o diâmetro à altura do peito; Ht é a altura total (m);  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os parâmetros da regressão;  $\varepsilon$  é a variável erro.



A seleção do modelo de regressão linear foi baseada no coeficiente de determinação corrigido, no desvio padrão residual e na distribuição gráfica dos resíduos padronizados.

As análises estatísticas foram realizadas nos pacotes estatísticos Sisvar e SAEG.

Para avaliar o efeito do sítio dentro das idades sobre as características avaliadas foi utilizada a estatística descritiva.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados da análise de variância do delineamento adotado, o ajuste dos modelos lineares em função do efeito da idade e das características de crescimento das árvores e a estatística descritiva serão discutidos a seguir.

### **4.1 Valores de índice de sítio determinados**

Na Tabela 2, estão representados os valores referentes ao índice de sítio para as diversas localidades que foram abrangidas neste estudo. Nota-se que os coeficientes de variação obtidos para as diversas localidades dentro de uma mesma idade apresentaram variabilidade expressiva, especialmente aos quatro anos de idade.

Tabela 2 Índice de sítio determinado para as localidades estudadas

| Idade | Sítio | IS (m) | CV (%) |
|-------|-------|--------|--------|
| 4     | 1     | 44,59  | 17,41  |
|       | 2     | 32,37  |        |
|       | 3     | 30,53  |        |
|       | 4     | 35,84  |        |
| 5     | 5     | 24,76  | 10,13  |
|       | 6     | 31,61  |        |
|       | 7     | 33,05  |        |
|       | 8     | 28,24  |        |
|       | 9     | 31,85  |        |
|       | 10    | 30,53  |        |
| 6     | 11    | 27,42  | 6,50   |
|       | 12    | 30,26  |        |
|       | 13    | 26,69  |        |
|       | 14    | 26,27  |        |
| 7     | 15    | 25,90  | 14,31  |
|       | 16    | 26,60  |        |
|       | 17    | 30,60  |        |
|       | 18    | 31,40  |        |
|       | 19    | 21,80  |        |
|       | 20    | 32,20  |        |
| 8     | 21    | 20,84  | 13,97  |
|       | 22    | 24,28  |        |
|       | 23    | 29,00  |        |
|       | 24    | 28,90  |        |
|       | 25    | 30,57  |        |
|       | 26    | 29,59  |        |
| 9     | 27    | 27,26  | 7,79   |
|       | 28    | 29,12  |        |
|       | 29    | 31,17  |        |
|       | 30    | 33,52  |        |
|       | 31    | 31,27  |        |

IS = índice de sítio; CV = coeficiente de variação.

## 4.2 Características de crescimento

Na Tabela 3 estão representados os valores médios e os coeficientes de variação das características de crescimento das árvores nas diferentes idades. Verifica-se que os valores, dentro de cada idade, apresentaram variações consideráveis em função dos diferentes sítios de plantio. Além disso, a ocorrência de valores médios de DAP, Ht e Hc inferiores em idades mais avançadas em comparação aos valores médios apresentados nas idades iniciais se deve à diferença na qualidade dos sítios dentro das idades.

Tabela 3 Valores médios e coeficiente de variação das características de crescimento das árvores

| Idade | DAP   | CV    | Ht    | CV    | Hc    | CV    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4     | 13,16 | 16,26 | 20,80 | 8,89  | 17,47 | 12,14 |
| 5     | 14,82 | 16,06 | 24,09 | 12,06 | 20,52 | 11,91 |
| 6     | 13,94 | 8,68  | 25,60 | 8,49  | 22,22 | 9,54  |
| 7     | 16,50 | 15,56 | 28,63 | 8,58  | 25,90 | 11,44 |
| 8     | 15,52 | 23,09 | 27,66 | 10,66 | 24,58 | 14,99 |
| 9     | 17,44 | 14,21 | 31,24 | 9,99  | 28,12 | 9,24  |

DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Ht = altura total (m); Hc = altura comercial (m); CV = coeficiente de variação (%).

Na Tabela 4 encontra-se o resumo da análise de variância para as características de crescimento das árvores. Observa-se que houve efeito significativo da idade, a 5% de probabilidade, somente para as variáveis: altura total e comercial. A altura média apresentou tendência crescente ainda que houvesse a interferência dos diferentes sítios dentro das idades.

Tabela 4 Resumo da análise de variância para as características de crescimento das árvores

| Análise de variância |    |                       |          |          |
|----------------------|----|-----------------------|----------|----------|
| FV                   | GL | Quadrado médio        |          |          |
|                      |    | DAP                   | Ht       | Hc       |
| Idade                | 5  | 11,7393 <sup>ns</sup> | 63,0955* | 70,6241* |
| Resíduo              | 25 | 6,7279                | 7,1699   | 7,8296   |
| Total                | 30 |                       |          |          |
| Média                |    | 15,38                 | 26,58    | 23,40    |
| CVe (%)              |    | 16,87                 | 10,07    | 11,96    |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Ht = altura total (m); Hc = altura comercial (m); CVe = coeficiente de variação experimental (%);\*, ns = significativo e não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

Pela Tabela 4, nota-se também que não houve efeito da idade para o DAP. Esse fato pode estar associado à diferença na qualidade dos sítios dentro das idades avaliadas.

Na Tabela 5 encontram-se as equações ajustadas que visam determinar as variáveis altura total e altura comercial em função da idade das árvores. As equações apresentaram altos coeficientes de determinação, além disso, a distribuição gráfica dos resíduos indicou que a quase totalidade dos erros está compreendida no intervalo entre 2 e -2 (Figura 2). Resíduos fora desse intervalo podem indicar a presença de *outliers* ou o modelo inadequado para um dado intervalo. Observa-se que não existe tendência de heterocedasticidade na distribuição dos resíduos.

Tabela 5 Relação funcional entre a idade e a altura das árvores

| Equações                 | R <sup>2</sup> |
|--------------------------|----------------|
| Ht = 14,092460+1,883810I | 92,28          |
| Hc = 10,303810+1,974286I | 91,79          |

I = idade (anos); Ht = altura total (m); Hc = altura comercial (m); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%).

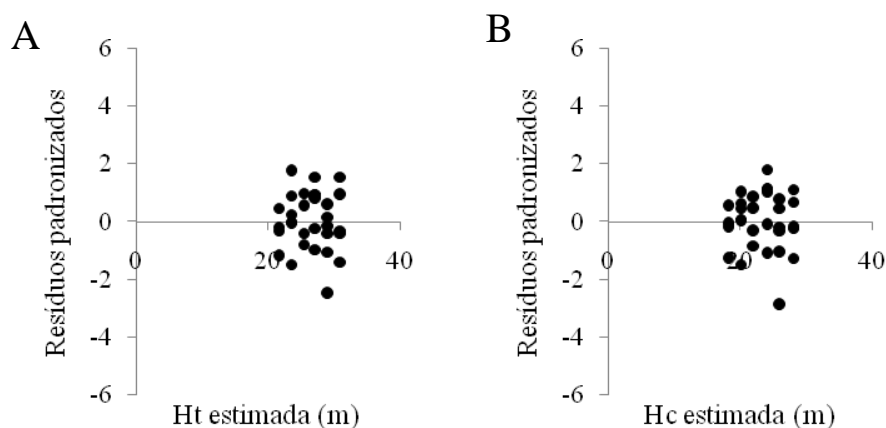


Figura 2 Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para estimar a altura total (A) e para estimar a altura comercial (B) em função da idade

### 4.3 Características da madeira

Os resultados referentes à densidade básica, ao poder calorífico superior e inferior, à densidade energética e à constituição elementar, molecular e polimérica da madeira das árvores amostradas são apresentados e discutidos adiante.

#### 4.3.1 Densidade básica

Os valores médios e os coeficientes de variação, por idade, referentes à densidade básica da madeira estão representados na Tabela 6. Nota-se que os

valores médios de densidade básica obtidos no disco à altura do peito ( $Db_{DAP}$ ) das plantas foram semelhantes aos valores médios apresentados pela densidade básica média ( $Db_{média}$ ) das árvores, calculada em relação as cinco posições longitudinais de amostragem. Entretanto, a  $Db_{média}$  apresentou valores ligeiramente maiores que a  $Db_{DAP}$  em todas as idades.

Tabela 6 Valores médios e coeficiente de variação para a densidade da madeira

| Idade | $Db_{DAP}$ | CV   | $Db_{média}$ | CV   |
|-------|------------|------|--------------|------|
| 4     | 0,445      | 7,71 | 0,454        | 4,05 |
| 5     | 0,459      | 6,46 | 0,479        | 4,26 |
| 6     | 0,459      | 6,19 | 0,478        | 4,50 |
| 7     | 0,465      | 4,21 | 0,484        | 4,13 |
| 8     | 0,477      | 5,15 | 0,482        | 3,01 |
| 9     | 0,523      | 4,19 | 0,534        | 4,96 |

$Db_{DAP}$  = densidade básica obtida na altura do DAP ( $g.cm^{-3}$ );  $Db_{média}$  = densidade básica média obtida com base nas cinco posições longitudinais relativas de amostragem ( $g.cm^{-3}$ ); CV = coeficiente de variação (%).

Os coeficientes de variação observados para as densidades calculadas foram baixos, o que demonstra que a interferência do ambiente na densidade da madeira dentro de cada idade analisada foi baixa (Tabela 6). Esses resultados estão em concordância com alguns estudos, porém, diversos trabalhos sugerem o oposto, ou seja, que a capacidade produtiva de um local exerce influência sobre a densidade da madeira. Gouvea et al. (2012), por exemplo, em estudo que visava caracterizar a qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus pellita* e de um híbrido natural em dois diferentes sítios, um de menor e outro de maior produtividade, observaram que a densidade média da madeira para todos os materiais genéticos analisados foi superior no sítio menos produtivo.

Na Tabela 7 encontra-se o resumo da análise de variância para a densidade básica da madeira. Nota-se que o efeito da idade foi significativo tanto para a  $Db_{DAP}$  quanto para a  $Db_{média}$  a 5% de probabilidade.

Tabela 7 Resumo da análise de variância para a densidade básica determinada na altura do DAP e para a densidade básica média

| Análise de variância |    |                   |                     |
|----------------------|----|-------------------|---------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio    |                     |
|                      |    | Db <sub>DAP</sub> | Db <sub>média</sub> |
| Idade                | 5  | 0,0036*           | 0,0032*             |
| Resíduo              | 25 | 0,0007            | 0,0004              |
| Total                | 30 |                   |                     |
| Média                |    | 0,472             | 0,486               |
| CVe (%)              |    | 5,52              | 4,18                |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; Db<sub>DAP</sub> densidade básica obtida na altura do DAP (g.cm<sup>-3</sup>); Db<sub>média</sub> = densidade básica obtida com base nas cinco posições longitudinais relativas de amostragem (g.cm<sup>-3</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); \* = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 8 encontram-se as equações ajustadas que visam determinar a relação funcional entre as variáveis Db<sub>DAP</sub> e Db<sub>média</sub> com a idade das árvores. A qualidade do ajuste das equações foi alta e a distribuição residual indicou a presença de dados pouco discrepantes, não indicando tendenciosidade na distribuição dos resíduos, ou seja, heterocedasticidade (Figura 3).

Tabela 8 Relações funcionais entre a idade e a densidade da madeira

| Equações                                 | R <sup>2</sup> |
|--|----------------|
| Db <sub>DAP</sub> = 0,387889+0,012833I   | 77,21          |
| Db <sub>média</sub> = 0,407784+0,011890I | 72,09          |

I = idade (anos); Db<sub>DAP</sub> = densidade básica obtida na altura do DAP (g.cm<sup>-3</sup>); Db<sub>média</sub> = densidade básica obtida com base nas cinco posições longitudinais relativas de amostragem (g.cm<sup>-3</sup>); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%).



Pela Tabela 8, observa-se que a relação entre as variáveis densidade e idade é positiva. O aumento da densidade da madeira com a idade das árvores se deve ao aumento da espessura da parede celular das células e à elevação da proporção de lenho tardio com o envelhecimento das plantas (FOELKEL et al., 1976). Modificações nas características químicas da madeira com a idade das árvores também podem ocasionar aumento na densidade.

Sette Júnior et al. (2012), em estudo que visava avaliar o efeito da idade nos valores de densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, aos 24, 48 e 72 meses de idade, também encontraram tendência crescente entre essas duas variáveis. Sturion, Pereira e Chemin (1988), igualmente verificaram um aumento na densidade básica da madeira de *Eucalyptus viminalis* com a idade das árvores.

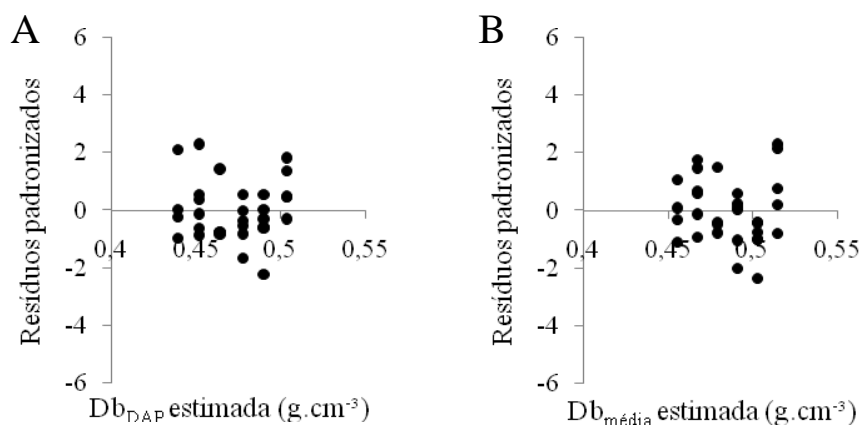


Figura 3 Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para a estimativa da densidade básica na altura do DAP (A) e da densidade básica média (B) em função da idade

#### 4.3.2 Análise elementar

Na Tabela 9 estão representados os valores médios e os coeficientes de variação dos constituintes elementares da madeira de *Eucalyptus*. Verifica-se que os coeficientes de variação obtidos para as variáveis analisadas foram baixos. Isso implica dizer que o fator ambiente, provavelmente, teve baixa influência na composição elementar dos materiais analisados. Apenas o CV obtido para a variável nitrogênio apresentou um valor distinguível ao obtido para os outros constituintes.

Tabela 9 Valores médios e coeficiente de variação para a porcentagem dos constituintes elementares da madeira

| Idade | N    | CV    | C     | CV   | H    | CV   | O     | CV   |
|-------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|
| 4     | 1,13 | 14,25 | 47,05 | 1,08 | 6,12 | 1,59 | 45,69 | 1,40 |
| 5     | 1,05 | 10,51 | 47,94 | 2,08 | 6,20 | 2,01 | 44,81 | 2,13 |
| 6     | 1,18 | 10,11 | 47,78 | 0,98 | 6,12 | 2,98 | 44,92 | 1,22 |
| 7     | 1,10 | 11,27 | 48,18 | 3,40 | 6,10 | 2,40 | 44,61 | 3,61 |
| 8     | 1,10 | 14,00 | 47,87 | 1,77 | 6,16 | 1,81 | 44,87 | 1,69 |
| 9     | 1,16 | 8,04  | 47,55 | 1,99 | 6,06 | 4,82 | 45,23 | 2,35 |

N = teor de nitrogênio (%); C = teor de carbono (%); H = teor de hidrogênio (%); O = teor de oxigênio (%); CV = coeficiente de variação (%).

Os valores médios obtidos para as características elementares da madeira estão em conformidade com outros estudos, pois independentemente da espécie, da idade e dos fatores ambientais, a composição química elementar da madeira de *Eucalyptus*, em base seca, é de aproximadamente 48% de carbono e 6% de hidrogênio (elementos que possuem relação positiva com o poder calorífico), 45% de oxigênio (elemento que contribui negativamente para o aumento do poder calorífico), 0,15% de nitrogênio e 0,01% de enxofre (BARCELLOS et al., 2005; PROTÁSIO et al., 2011; REIS et al., 2012).

O resumo da análise de variância referente ao teor de nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio está representado na Tabela 10. O efeito da idade foi não significativo, a 5% de probabilidade, para todas as variáveis analisadas,

ou seja, os dados obtidos apresentaram certa oscilação, não havendo tendência de aumento ou diminuição dos constituintes elementares com o passar da idade das plantas. Santana (2009), ao avaliar a composição elementar da madeira de *Eucalyptus grandise E. urophylla*, aos 34, 48, 61, 74 e 86 meses de idade, observou que o teor de carbono e oxigênio não sofreu interferência da idade, porém a porcentagem de nitrogênio na madeira diminuiu com o aumento da idade das árvores.

Tabela 10 Resumo da análise de variância obtida para o teor de nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio

| FV      | GL | Análise de variância |                      |                      |                      |
|---------|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         |    | Quadrado médio       |                      |                      |                      |
|         |    | N                    | C                    | H                    | O                    |
| Idade   | 5  | 0,0091 <sup>ns</sup> | 0,7538 <sup>ns</sup> | 0,0118 <sup>ns</sup> | 0,6893 <sup>ns</sup> |
| Resíduo | 25 | 0,0174               | 1,1514               | 0,0285               | 1,0813               |
| Total   | 30 |                      |                      |                      |                      |
| Média   |    | 1,11                 | 47,79                | 6,13                 | 44,98                |
| CVe (%) |    | 11,85                | 2,25                 | 2,75                 | 2,31                 |

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; N = teor de nitrogênio (%); C = teor de carbono (%); H = teor de hidrogênio (%); O = teor de oxigênio (%); CVe = coeficiente de variação experimental (%); ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

### 4.3.3 Análise química

Os valores médios e os coeficientes de variação referentes ao teor de lignina, extrativos, cinzas e holocelulose estão representados na Tabela 11. Verifica-se que a alta variabilidade encontrada pelo teor de extrativos e cinzas nas diferentes idades se deva, provavelmente, à interferência dos diferentes sítios analisados dentro de cada tratamento.

Tabela 11 Valores médios e coeficiente de variação para a porcentagem dos constituintes químicos

| Idade | Lig   | CV   | Ext  | CV    | Cz   | CV    | Holo  | CV   |
|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|------|
| 4     | 27,79 | 5,80 | 2,89 | 30,49 | 0,28 | 24,45 | 69,04 | 3,04 |
| 5     | 28,27 | 4,47 | 3,52 | 40,26 | 0,22 | 22,87 | 67,99 | 2,63 |
| 6     | 28,18 | 3,14 | 4,22 | 12,99 | 0,21 | 11,87 | 67,39 | 1,64 |
| 7     | 26,71 | 3,76 | 4,74 | 17,11 | 0,19 | 19,54 | 68,36 | 1,65 |
| 8     | 25,46 | 6,88 | 4,21 | 34,05 | 0,18 | 9,89  | 70,14 | 3,70 |
| 9     | 24,41 | 4,46 | 5,12 | 11,93 | 0,09 | 15,93 | 70,38 | 1,86 |

Lig = teor de lignina (%); Ext = teor de extrativos (%); Cz = teor de cinzas (%); Holo = teor de holocelulose (%); CV = coeficiente de variação (%).

O resumo da análise de variância realizada para o estudo da caracterização química dos materiais analisados está representado na Tabela 12. Observa-se que houve efeito significativo da idade do material genético, a 5% de probabilidade, para os constituintes químicos, exceto para o teor de holocelulose. Santana et al. (2012), também não encontraram diferença significativa entre o teor de holocelulose e a idade ao estudar a madeira do clone do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Alguns trabalhos, porém, demonstram que o teor de holocelulose pode aumentar com a idade da árvore. Silva et al. (2005), por exemplo, encontraram uma relação positiva entre essas duas variáveis.

Tabela 12 Resumo da análise de variância obtida para os teores de lignina, extrativos, elementos minerais e holocelulose

| Análise de variância |    |                |         |         |                      |
|----------------------|----|----------------|---------|---------|----------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio |         |         |                      |
|                      |    | Lig            | Ext     | Cz      | Holo                 |
| Idade                | 5  | 12,7557*       | 3,1144* | 0,0167* | 7,1946 <sup>ns</sup> |
| Resíduo              | 25 | 1,7278         | 1,1319  | 0,0014  | 3,1916               |
| Total                | 30 |                |         |         |                      |
| Média                |    | 26,73          | 4,16    | 0,19    | 68,92                |
| CVe (%)              |    | 4,92           | 25,59   | 19,57   | 2,59                 |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; Lig = teor de lignina (%); Ext = teor de extrativos (%); Cz = teor de cinzas (%); Holo = teor de holocelulose (%); CVe = coeficiente de variação experimental (%); \*, ns = significativo e não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

Na Tabela 13 estão representadas as equações ajustadas que visam estimar os constituintes químicos da madeira em função da idade. As relações foram explicadas por modelos lineares simples. A qualidade do ajuste variou entre 81,65% para o teor de lignina e 87,57% para o teor de cinzas e a distribuição gráfica dos resíduos indicaram que os erros não apresentaram tendenciosidade, exceto para o teor de cinzas. Nota-se também poucos dados discrepantes (Figura 4).

Tabela 13 Relações funcionais entre a idade e a constituição elementar da madeira

| Equações                  | R <sup>2</sup> |
|---------------------------|----------------|
| Lig = 31,780754-0,765881I | 81,65          |
| Ext = 1,563937+0,392762I  | 82,40          |
| Cz = 0,393738-0,030357I   | 87,57          |

I = idade (anos); Lig = teor de lignina (%); Ext = teor de extrativos (%); Cz = teor de cinzas (%); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%).

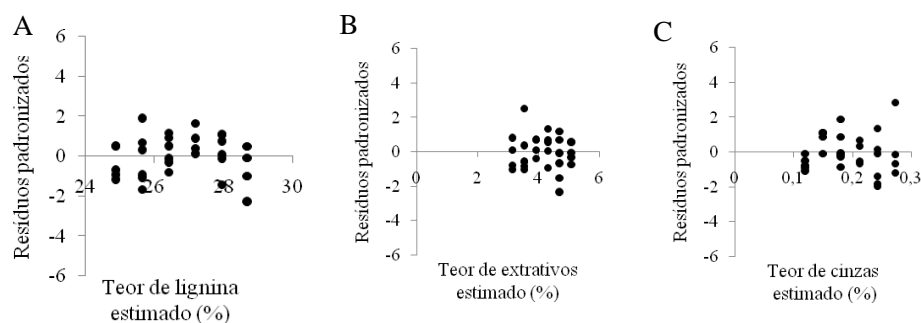


Figura 4 Distribuição residual dos modelos ajustados para estimar o teor de lignina (A), de extrativos (B) e de cinzas (C) em função da idade

O modelo que representa o teor de lignina na madeira relacionado com a idade (Tabela 13) demonstra que a porcentagem de lignina na madeira diminui com a maturação da planta, o que é indesejável quando a árvore é abatida em idades superiores, já que a presença de lignina na madeira é benéfica quando ela é destinada para fins energéticos - a lignina apresenta grande estabilidade térmica durante a queima do material em razão da sua estrutura aromática, além de apresentar elevado poder calorífico. Entretanto, a relação entre os grupos guaiacil (G) e siringil (S) presentes na lignina das angiospermas também interfere na qualidade da madeira para fins energéticos. Segundo Soares (2011), para madeiras destinadas à produção de energia, deve-se procurar por materiais que apresentem menores relações S/G, uma vez que o grupo siringil possui um grupo metoxila a mais do que o grupo guaiacil, tornando-se mais reativo, ou seja, mais facilmente oxidado durante a queima do material, sendo então menos estável termicamente. Morais (2008) e Soares (2011) observaram uma diminuição na relação S/G com o aumento da idade das árvores.

Os valores referentes à relação entre a idade e a porcentagem de lignina na madeira estão de acordo com outros estudos. Trugilho, Lima e Mendes (1996), por exemplo, encontraram valores semelhantes aos relatados neste

trabalho, onde o teor de lignina variou de 24,49% a 27,04% em árvores de *Eucalyptus saligna*, com tendência a diminuição com a idade (12, 24, 36 e 48 meses), e, a equação ajustada pelos autores para avaliar o efeito da idade sobre a porcentagem de lignina na madeira obteve um ajuste de 87,81%.

Em relação ao teor de extrativos totais, pode-se verificar pelo modelo ajustado que este apresentou uma correlação positiva com a idade das árvores. Segundo Trugilho, Lima e Mendes (1996), esse fato está relacionado com as mudanças provocadas pelo processo de cernificação da madeira, no qual os extrativos, principalmente os polifenólicos, são lançados no cerne. A presença de extrativos na madeira quando ela é destinada à produção de energia, em alguns casos, é interessante, pois determinadas classes de extrativos apresentam alto poder calorífico.

Para o teor de cinzas, nota-se a partir da equação ajustada, que a porcentagem de elementos minerais diminuiu com o aumento da idade das árvores. Quando a madeira é destinada para fins energéticos, os elementos minerais são indesejáveis, pois eles não são capazes de gerar energia, se tornando assim resíduos sólidos remanescentes do processo de combustão ou conversão da madeira.

De forma análoga ao encontrado nesta pesquisa, Soares (2011), encontrou valores referentes à porcentagem de cinzas na madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* que variaram de 0,41% aos 3 anos a 0,18% aos 7 anos de idade, sendo obtida uma equação com um ajuste de 99,61% para explicar essa relação. Essa variação observada referente ao material inorgânico pode estar associada com a atividade fisiológica das árvores, visto que as árvores jovens, pelo intenso desenvolvimento, podem apresentar maior quantidade de substâncias minerais consideradas essenciais para o desenvolvimento fisiológico, quando comparadas às árvores com idades

superiores que se encontram em um ritmo de desenvolvimento menor e estável (ANDRADE, 2006).

#### 4.3.4 Poder calorífico e densidade energética

Na Tabela 14 encontram-se os valores médios e os coeficientes de variação referentes ao poder calorífico e à densidade energética da madeira nas diferentes idades. Os coeficientes de variação determinados para o poder calorífico superior, poder calorífico inferior e para a densidade energética foram baixos, o que indica que essas variáveis obtiveram uma baixa variabilidade entre os diferentes sítios analisados dentro de cada idade.

Tabela 14 Valores médios e coeficiente de variação para o poder calorífico e para a densidade energética

| Idade | PCS  | CV   | PCI  | CV   | DE   | CV   |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 4     | 4589 | 0,74 | 4259 | 0,88 | 2,08 | 4,54 |
| 5     | 4579 | 1,11 | 4244 | 1,19 | 2,19 | 5,02 |
| 6     | 4573 | 1,20 | 4242 | 1,41 | 2,18 | 4,23 |
| 7     | 4582 | 0,92 | 4253 | 1,01 | 2,22 | 3,89 |
| 8     | 4575 | 1,63 | 4242 | 1,77 | 2,21 | 3,69 |
| 9     | 4542 | 1,08 | 4214 | 0,84 | 2,42 | 5,50 |

PCS = poder calorífico superior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ); PCI = poder calorífico inferior ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ); DE = densidade energética ( $\text{Gcal.m}^{-3}$ ); CV = coeficiente de variação (%).

O resumo da análise de variância realizado para avaliar o efeito da idade nas características energéticas da madeira encontra-se descrito na Tabela 15. Nota-se que a idade não influenciou, a 5% de probabilidade, nos valores de poder calorífico superior e inferior. Entretanto, Kumar et al. (2010), estudando a madeira de híbridos de eucalipto de 2 a 6 anos, constataram que o poder calorífico aumentou em função da idade das árvores. Soares (2011), também observou a existência de uma relação positiva entre essas duas variáveis.



Tabela 15 Resumo da análise de variância determinada para o poder calorífico superior e inferior e para a densidade energética

| Análise de variância |    |                         |                        |          |
|----------------------|----|-------------------------|------------------------|----------|
| FV                   | GL | Quadrado médio          |                        |          |
|                      |    | PCS                     | PCI                    | DE       |
| Idade                | 5  | 1337,0163 <sup>ns</sup> | 1117,031 <sup>ns</sup> | 0,05883* |
| Resíduo              | 25 | 2875,0587               | 2812,0080              | 0,0100   |
| Total                | 30 |                         |                        |          |
| Média                |    | 4573                    | 4242                   | 2,2223   |
| CVe (%)              |    | 1,17                    | 1,25                   | 4,50     |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; PCS = poder calorífico superior (kcal.kg<sup>-1</sup>); PCI = poder calorífico inferior (kcal.kg<sup>-1</sup>); DE = densidade energética (Gcal.m<sup>-3</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); \*, ns - significativo e não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

Na Tabela 15, verifica-se que o efeito da idade, porém, afetou significativamente a densidade energética da madeira. Esse fato pode estar associado ao efeito da idade sobre a densidade básica, característica que foi afetada pela idade neste estudo. Santana et al. (2012), também encontraram relação funcional entre a densidade energética da madeira do clone do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com a idade, sendo, a relação entre as variáveis positiva.

A equação ajustada a partir de um modelo linear simples para estimar a densidade energética em função da idade demonstra que é crescente a tendência dos valores de densidade energética com o aumento da idade das árvores (Tabela 16). A equação ajustada apresentou alto coeficiente de determinação e a ausência de tendenciosidade, ou seja, heterocedasticidade na distribuição gráfica dos resíduos (Figura 5).

Tabela 16 Relação funcional entre a idade e a densidade energética

| Equação                     | R <sup>2</sup> |
|-----------------------------|----------------|
| $DE = 1,885754 + 0,051119I$ | 72,97          |

I = idade (anos); DE = densidade energética (Gcal/m<sup>3</sup>); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%).

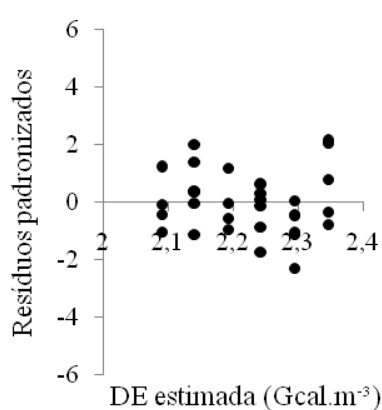


Figura 5 Distribuição dos resíduos do modelo ajustado para estimar a densidade energética em função da idade

#### 4.4 Características de produção

Na Tabela 17 são representados os valores médios e os coeficientes de variação nas diferentes idades para as variáveis: volume, IMA volumétrico e IMA em produção de massa seca (MsDb<sub>DAP</sub> e MsDb<sub>média</sub>). Nota-se que os valores médios obtidos para a variável volume não apresentaram o resultado esperado, ou seja, não houve um aumento sucessivo do volume obtido por hectare com o envelhecimento das árvores. Esse resultado, assim como os obtidos para as características de crescimento das árvores, se deve a interferência dos diferentes sítios dentro das idades.

Os coeficientes de variação apresentados nas diferentes idades para o IMA volumétrico e para o IMA em produção de massa seca também foram altos.

Tabela 17 Valores médios para a produção de volume e para os incrementos em volume e em massa seca

| Idade | Vol    | CV    | IMA <sub>vol</sub> | CV    | MsDb <sub>DAP</sub> | CV    | MsDb <sub>média</sub> | CV    |
|-------|--------|-------|--------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-------|
| 4     | 144,81 | 37,76 | 35,60              | 40,51 | 15596,13            | 37,65 | 16002,15              | 38,53 |
| 5     | 229,54 | 43,85 | 46,70              | 45,16 | 21819,36            | 50,75 | 22420,72              | 47,45 |
| 6     | 200,03 | 26,75 | 33,60              | 30,37 | 15349,14            | 28,46 | 16001,70              | 28,46 |
| 7     | 321,10 | 40,73 | 45,59              | 40,55 | 21182,27            | 40,54 | 22013,58              | 40,80 |
| 8     | 297,98 | 57,31 | 36,43              | 54,31 | 17627,35            | 55,93 | 17753,31              | 55,55 |
| 9     | 381,88 | 36,70 | 42,28              | 36,65 | 21943,19            | 34,49 | 22304,88              | 33,31 |

Vol = volume ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ); IMA<sub>vol</sub> = incremento médio anual volumétrico ( $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); MsDb<sub>DAP</sub> = incremento médio anual em massa seca calculado com base na densidade básica medida na altura do DAP ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); MsDb<sub>média</sub> = incremento médio anual em massa seca calculado com base na densidade básica média ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); CV = coeficiente de variação (%).

Na Tabela 18 encontra-se o resumo da análise de variância determinada para o volume e para os IMAs calculados. O efeito da idade foi não significativo, a 5% de probabilidade, para as características analisadas. Provavelmente, a ausência da interferência da idade nos IMAs e no volume se deva também a influência de diferentes ambientes de plantio nas idades analisadas.

Tabela 18 Resumo da análise de variância obtido para a produção em volume, para o IMA volumétrico e para o IMA em massa seca

| Análise de variância |    |                         |                        |                            |                           |
|----------------------|----|-------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio          |                        |                            |                           |
|                      |    | Vol                     | IMA <sub>vol</sub>     | MSDb <sub>DAP</sub>        | MSDb <sub>média</sub>     |
| Idade                | 5  | 35006,706 <sup>ns</sup> | 157,1894 <sup>ns</sup> | 45666726,874 <sup>ns</sup> | 48496191,61 <sup>ns</sup> |
| Resíduo              | 25 | 15126,3338              | 311,4142               | 74311871,08                | 74104118,12               |
| Total                | 30 |                         |                        |                            |                           |
| Média                |    | 270,34                  | 40,66                  | 19266,77                   | 19763,35                  |
| CVe                  |    | 45,49                   | 43,40                  | 44,74                      | 43,56                     |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; Vol = volume (m<sup>3</sup>.ha); IMA<sub>vol</sub> = incremento médio anual volumétrico (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); MSDb<sub>DAP</sub> = incremento médio anual em massa seca calculado com base na densidade básica medida na altura do DAP (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); MSDb<sub>média</sub> = incremento médio anual em massa seca calculado com base na densidade básica média (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Esperava-se, porém, que os valores de incremento anual volumétrico e em massa seca apresentassem variações ao longo dos anos, já que diversos trabalhos demonstram que o IMA aumenta com idade das árvores até certo ponto, sendo que, a partir desse momento, o incremento na produção tende a decrescer ao longo dos anos.

Rezende e Ferraz (1986), por exemplo, em um estudo que avaliou a produção de madeira de *Eucalyptus grandis* em função da idade, reportaram que o IMA volumétrico e o ICA (incremento corrente anual) volumétrico aumentaram em função da idade das árvores, sendo que a partir do quarto ano começou a ocorrer um decréscimo no ICA e a partir do nono ano uma diminuição nos valores de IMA. Os autores ainda demonstraram qual seria a idade de corte ideal das árvores, ou seja, o ponto onde se buscou maximizar a produtividade de madeira por unidade de área por ano. Segundo diversos

pesquisadores, do ponto de vista técnico, a idade de corte é atingida quando o valor do IMA iguala-se ao valor do ICA.

Na Tabela 19 encontra-se os valores médios e os coeficientes de variação relativos ao IMA dos compostos elementares e na Tabela 20 os valores médios e os CVs referentes ao IMA molecular e polimérico da madeira. Verifica-se que os valores de coeficiente de variação obtidos para as variáveis analisadas dentro de cada idade foram altos, o que era esperado, uma vez que os valores de IMA total ( $MsDb_{DAP}$  e  $MsDb_{média}$ ) também apresentaram uma alta variação.

Tabela 19 Valores médios e coeficiente de variação para os incrementos elementares

| Idade | IMA <sub>Nit</sub> | CV    | IMA <sub>Carb</sub> | CV    | IMA <sub>Hid</sub> | CV    | IMA <sub>Oxi</sub> | CV    |
|-------|--------------------|-------|---------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| 4     | 181,99             | 45,13 | 7548,93             | 39,51 | 982,02             | 39,49 | 7289,21            | 37,33 |
| 5     | 235,58             | 50,35 | 10788,04            | 48,48 | 1388,81            | 47,79 | 10008,29           | 46,36 |
| 6     | 185,34             | 20,57 | 7646,22             | 28,33 | 973,20             | 26,03 | 7196,93            | 29,17 |
| 7     | 248,78             | 50,23 | 10515,32            | 37,95 | 1341,32            | 39,85 | 9908,16            | 44,07 |
| 8     | 196,39             | 64,28 | 8525,60             | 55,85 | 1096,88            | 56,75 | 7934,43            | 54,92 |
| 9     | 255,31             | 29,46 | 10630,96            | 33,73 | 1341,63            | 30,06 | 10076,98           | 33,60 |

IMA<sub>Nit</sub> = incremento médio anual em nitrogênio ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); IMA<sub>Carb</sub> = incremento médio anual em carbono ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); IMA<sub>Hid</sub> = incremento médio anual em hidrogênio ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); IMA<sub>Oxi</sub> = incremento médio anual em oxigênio ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); CV = coeficiente de variação (%).

Tabela 20 Valores médios e coeficiente de variação para os incrementos em lignina, extrativos, cinzas e holocelulose

| Idade | IMA <sub>Lig</sub> | CV    | IMA <sub>Ext</sub> | CV    | IMA <sub>Cz</sub> | CV    | IMA <sub>Holo</sub> | CV    |
|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|-------------------|-------|---------------------|-------|
| 4     | 4402,57            | 35,18 | 454,07             | 38,25 | 42,69             | 29,00 | 11102,81            | 40,83 |
| 5     | 6392,17            | 48,63 | 858,02             | 90,25 | 46,55             | 39,16 | 15123,97            | 45,35 |
| 6     | 4524,75            | 30,32 | 661,99             | 22,77 | 33,05             | 23,92 | 10781,89            | 28,32 |
| 7     | 5875,87            | 41,61 | 1050,64            | 46,71 | 42,31             | 43,81 | 15044,77            | 40,27 |
| 8     | 4637,94            | 61,29 | 792,44             | 73,53 | 32,70             | 58,72 | 12290,23            | 52,87 |
| 9     | 5452,02            | 33,35 | 1163,78            | 42,66 | 21,71             | 44,27 | 15667,37            | 32,82 |

IMA<sub>Lig</sub> = incremento médio anual em lignina (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Ext</sub> = incremento médio anual em extrativos (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Cz</sub> = incremento médio anual em cinzas (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Holo</sub> = incremento médio anual em holocelulose (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); CV = coeficiente de variação (%).

Embora fosse esperado que o IMA dos constituintes químicos possuísse relação funcional com a idade das árvores, as Tabelas 21 e 22 demonstraram que, assim como apresentado pela variável IMA total, o efeito da idade foi não significativo, a 5% de probabilidade, para as variáveis IMA elementar e IMA molecular e polimérico.

Desse modo, em função da ausência de uma tendência dos valores de todos os incrementos calculados com a idade, não foi possível determinar um ponto ideal de colheita das árvores neste estudo.

Tabela 21 Resumo da análise de variância para os incrementos em nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio

| Análise de variância |    |                         |                             |                           |                            |
|----------------------|----|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio          |                             |                           |                            |
|                      |    | IMA <sub>Nit</sub>      | IMA <sub>Carb</sub>         | IMA <sub>Hid</sub>        | IMA <sub>Oxi</sub>         |
| Idade                | 5  | 5316,8583 <sup>ns</sup> | 11424519,6979 <sup>ns</sup> | 178180,9811 <sup>ns</sup> | 9592345,0823 <sup>ns</sup> |
| Resíduo              | 25 | 11014,1415              | 16879121,8212               | 274500,0508               | 15167183,8489              |
| Total                | 30 |                         |                             |                           |                            |
| Média                |    | 220,34                  | 9448,68                     | 1209,39                   | 8884,99                    |
| CVe                  |    | 47,63                   | 43,48                       | 43,32                     | 43,83                      |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; IMA<sub>Nit</sub> = incremento médio anual em nitrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Carb</sub> = incremento médio anual em carbono (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Hid</sub> = incremento médio anual em hidrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Oxi</sub> = incremento médio anual em oxigênio (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 22 Resumo da análise de variância para os incrementos em lignina, extrativos, cinzas e holocelulose

| Análise de variância |    |                            |                           |                        |                             |
|----------------------|----|----------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio             |                           |                        |                             |
|                      |    | IMA <sub>Lig</sub>         | IMA <sub>Ext</sub>        | IMA <sub>Cz</sub>      | IMA <sub>Holo</sub>         |
| Idade                | 5  | 3503490,4757 <sup>ns</sup> | 304377,5820 <sup>ns</sup> | 437,6678 <sup>ns</sup> | 22960519,1389 <sup>ns</sup> |
| Resíduo              | 25 | 5787140,1946               | 281767,1460               | 249,6412               | 33010297,6922               |
| Total                | 30 |                            |                           |                        |                             |
| Média                |    | 5303,4                     | 854,51                    | 36,80                  | 13568,69                    |
| CVe                  |    | 45,36                      | 62,12                     | 42,93                  | 42,34                       |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; IMA<sub>Lig</sub> = incremento médio anual em lignina (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Ext</sub> = incremento médio anual em extrativos (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Cz</sub> = incremento médio anual em cinzas (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); IMA<sub>Holo</sub> = incremento médio anual em holocelulose (kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Nas Tabela 23, 24 e 25 estão representados os valores médios e os coeficientes de variação referentes à produção de massa seca nas diferentes idades. Os coeficientes de variação observados nas diferentes idades para todas

as variáveis analisadas foram altos. A alta variabilidade existente para os valores de volume e para os incrementos explicam esse resultado.

Tabela 23 Valores médios e coeficiente de variação para a produção total em massa seca

| Idade | Prod <sub>Ms</sub> | CV    |
|-------|--------------------|-------|
| 4     | 64008,60           | 38,53 |
| 5     | 112103,61          | 47,45 |
| 6     | 96010,18           | 28,46 |
| 7     | 154095,09          | 40,81 |
| 8     | 142026,47          | 55,55 |
| 9     | 200743,93          | 33,31 |

Prod<sub>Ms</sub> = produção em massa seca total (kg.ha<sup>-1</sup>); CV = coeficiente de variação (%).

Tabela 24 Valores médios e coeficiente de variação para a produção elementar

| Idade | Prod <sub>Nit</sub> | CV    | Prod <sub>Carb</sub> | CV    | Prod <sub>Hid</sub> | CV    | Prod <sub>Oxi</sub> | CV    |
|-------|---------------------|-------|----------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| 4     | 727,97              | 45,13 | 30195,71             | 39,51 | 3928,07             | 39,49 | 29156,86            | 37,33 |
| 5     | 1177,91             | 50,35 | 53940,20             | 48,48 | 6944,07             | 47,79 | 50041,43            | 46,36 |
| 6     | 1112,07             | 20,57 | 45877,33             | 28,34 | 5839,18             | 26,03 | 43181,59            | 29,17 |
| 7     | 1741,50             | 50,23 | 73607,23             | 37,95 | 9389,25             | 39,85 | 69357,11            | 44,07 |
| 8     | 1571,15             | 64,28 | 68204,80             | 55,85 | 8775,08             | 56,75 | 63475,43            | 54,92 |
| 9     | 2297,81             | 29,46 | 95678,66             | 33,73 | 12074,63            | 30,06 | 90692,82            | 33,60 |

Prod<sub>Nit</sub> = produção em nitrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Carb</sub> = produção em carbono (kg.ha<sup>-1</sup>);  
 Prod<sub>Hid</sub> = produção em hidrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Oxi</sub> = produção em oxigênio (kg.ha<sup>-1</sup>);  
 CV = coeficiente de variação (%).



Tabela 25 Valores médios e coeficiente de variação para a produção em lignina, extrativos, cinzas e holocelulose

| Idade | Prod <sub>Lig</sub> | CV    | Prod <sub>Ext</sub> | CV    | Prod <sub>Cz</sub> | CV    | Prod <sub>Holo</sub> | CV    |
|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|--------------------|-------|----------------------|-------|
| 4     | 17610,29            | 35,18 | 1816,27             | 38,25 | 170,78             | 29,00 | 44411,26             | 40,83 |
| 5     | 31960,85            | 48,63 | 4290,11             | 90,25 | 232,78             | 39,16 | 75619,87             | 45,35 |
| 6     | 27148,53            | 30,32 | 3971,96             | 22,77 | 198,33             | 23,92 | 64691,35             | 28,32 |
| 7     | 41131,08            | 41,61 | 7354,45             | 46,71 | 296,18             | 43,81 | 105313,36            | 40,27 |
| 8     | 37103,50            | 61,29 | 6339,54             | 73,53 | 261,61             | 58,73 | 98321,81             | 52,87 |
| 9     | 49068,22            | 33,35 | 10474,01            | 42,66 | 195,38             | 44,27 | 141006,32            | 32,82 |

Prod<sub>Lig</sub> = produção em lignina (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Ext</sub> = produção em extrativos (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Cz</sub> = produção em cinzas (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Holo</sub> = produção em holocelulose (kg.ha<sup>-1</sup>); CV = coeficiente de variação (%).

Nas Tabelas 26, 27 e 28 encontra-se o resumo da análise de variância obtido para as produções em massa seca por hectare. Observa-se que houve efeito significativo da idade, a 5% de probabilidade, para a produção de massa seca total (Prod<sub>Ms</sub>) e para as outras produções calculadas. Porém, para a produção de lignina (Prod<sub>Lig</sub>) e cinzas (Prod<sub>Cz</sub>) o efeito da idade foi não significativo, o que pode estar associado aos diferentes ambientes de plantio analisados em cada idade.

Tabela 26 Resumo da análise de variância para a produção total em massa seca

| Análise de variância |    |                          |
|----------------------|----|--------------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio           |
|                      |    | Prod <sub>Ms</sub>       |
| Idade                | 5  |                          |
| Resíduo              | 25 | 1,0642x10 <sup>10*</sup> |
| Total                | 30 | 3,4794x10 <sup>9</sup>   |
| Média                |    | 132036,87                |
| CVe                  |    | 44,67                    |

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; Prod<sub>Ms</sub> = produção total em massa seca (kg.ha<sup>-1</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); \* = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 27 Resumo da análise de variância para a produção em nitrogênio, carbono, hidrogênio e oxigênio

| Análise de variância |    |                     |                          |                     |                          |
|----------------------|----|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio      |                          |                     |                          |
|                      |    | Prod <sub>Nit</sub> | Prod <sub>Carb</sub>     | Prod <sub>Hid</sub> | Prod <sub>Oxi</sub>      |
| Idade                | 5  | 1431158,8572*       | 2,4292x10 <sup>9</sup> * | 37947677,1476*      | 2,1654x10 <sup>9</sup> * |
| Resíduo              | 25 | 520092,5253         | 787066284,4680           | 12636254,5447       | 719333181,7687           |
| Total                | 30 |                     |                          |                     |                          |
| Média                |    | 1477,23             | 63135,45                 | 8067,39             | 59356,81                 |
| CVe                  |    | 48,82               | 44,44                    | 44,06               | 45,19                    |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; Prod<sub>Nit</sub> = produção em nitrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Carb</sub> = produção em carbono (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Hid</sub> = produção em hidrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Oxi</sub> = produção em oxigênio (kg.ha<sup>-1</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); \* = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 28 Resumo da análise de variância para a produção em lignina, extrativos, cinzas e holocelulose

| Análise de variância |    |                              |                     |                          |                          |
|----------------------|----|------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| FV                   | GL | Quadrado médio               |                     |                          |                          |
|                      |    | Prod <sub>Lig</sub>          | Prod <sub>Ext</sub> | Prod <sub>Cz</sub>       | Prod <sub>Holo</sub>     |
| Idade                | 5  | 550661268,2939 <sup>ns</sup> | 43116208,2768*      | 11286,1987 <sup>ns</sup> | 5,3847x10 <sup>9</sup> * |
| Resíduo              | 25 | 265918464,3980               | 13054118,7033       | 11514,6880               | 1,5579x10 <sup>9</sup>   |
| Total                | 30 |                              |                     |                          |                          |
| Média                |    | 35017,77                     | 5917,03             | 232,16                   | 90870,07                 |
| CVe                  |    | 46,57                        | 61,06               | 46,22                    | 43,44                    |

FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; Prod<sub>Lig</sub> = produção em lignina (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Ext</sub> = produção em extrativos (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Cz</sub> = produção em cinzas (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Holo</sub> = produção em holocelulose (kg.ha<sup>-1</sup>); CVe = coeficiente de variação experimental (%); \*, ns = significativo e não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

Na Figura 6 encontra-se os modelos ajustados que avaliam o efeito da idade sobre os dados de produção. As equações apresentaram elevados coeficientes de determinação e a dispersão gráfica dos resíduos indicou a presença de dados pouco discrepantes e a ausência de tendenciosidade dos erros, ou seja, heterocedasticidade.

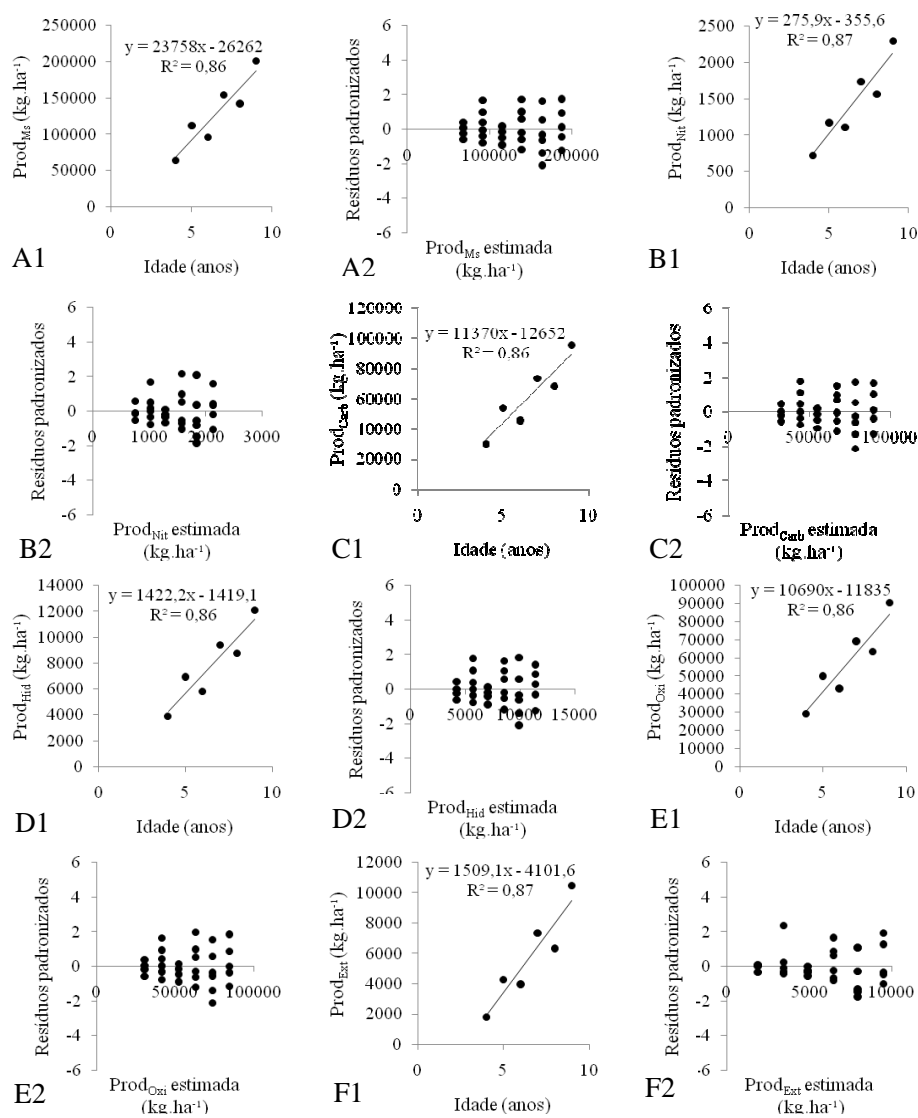


Figura 6 Relação funcional (1) entre a produção de massa seca total (A), de nitrogênio (B), de carbono (C), de hidrogênio (D), de oxigênio (E), de extrativos (F) e de holocelulose (G) e a idade, com a distribuição de resíduos (2) (...continua...).

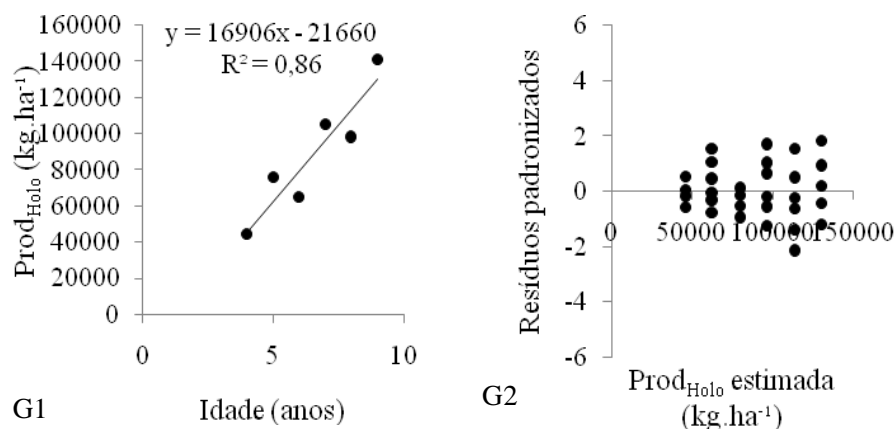


Figura 7 Relação funcional (1) entre a produção de massa seca total (A), de nitrogênio (B), de carbono (C), de hidrogênio (D), de oxigênio (E), de extrativos (F) e de holocelulose (G) e a idade, com a distribuição de resíduos (2).

As características de produção da madeira, a efeito de comparação, devem ser bastante analisadas, uma vez que, a produtividade dos plantios de eucalipto, além de serem afetados por fatores genéticos, pela idade e pelo ambiente de plantio sofre também uma grande influência do espaçamento, das práticas silviculturais e de manejo.

Diferentes sítios ou ambientes, como já demonstrado neste trabalho, possibilitam um acréscimo ou um decréscimo crucial nos valores de produção. Santos, L. C. et al. (2012), por exemplo, em estudo que visava avaliar a produção de massa seca de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade em Turmalina e em Itacambira, municípios situados no estado de Minas Gerais, no espaçamento de 3,0 m x 3,0 m, verificaram que a produção em massa seca em Turmalina foi de 23,28 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e em Itacambira foi de 16,5 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Rocha (2011), porém, analisando a madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* plantado no município de Itamarandiba, obteve no

espaçamento de 3,0 m x 3,0 m, aos 77 meses idade, uma produção de matéria seca de madeira de 17,31 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Ainda assim, independentemente do espaçamento de plantio e das práticas adotadas, é possível verificar que o clone GG 100 se constitui em um material genético com grande potencial para produção volumétrica nos sítios mais produtivos, já que segundo a ABRAF (2013), a produtividade média ponderada, em função da área plantada, dos plantios de *Eucalyptus* de suas empresas associadas, em 2012 atingiu 40,7 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, e neste estudo, os plantios apresentaram em média um valor semelhante à média da produtividade apontada pela ABRAF.

#### **4.5 Predição da massa seca a partir dos valores de DAP e altura**

Em virtude da interferência dos diferentes sítios nos valores de crescimento e de produção em cada idade analisada, foram ajustados modelos para a estimativa das produções apenas com os dados de altura e DAP das árvores. As equações ajustadas encontram-se na Tabela 29.

Tabela 29 Equações ajustadas para a determinação dos valores de produção em função do DAP e da altura

| Equações   | R <sup>2</sup> |
|--|----------------|
| $Prod_{Ms} = -0,267527 \times 10^6 + 0,182511 \times 10^5 DAP + 0,447411 \times 10^4 Ht$   | 94,63          |
| $Prod_{Ms} = -0,245601 \times 10^6 + 0,193287 \times 10^5 DAP + 0,343781 \times 10^4 Hc$   | 93,99          |
| $Prod_{Carb} = -0,127657 \times 10^6 + 0,863456 \times 10^4 DAP + 0,218289 \times 10^4 Ht$ | 94,79          |
| $Prod_{Carb} = -0,116864 \times 10^6 + 0,920753 \times 10^4 DAP + 0,164213 \times 10^4 Hc$ | 94,07          |
| $Prod_{Hid} = -0,157402 \times 10^5 + 0,113318 \times 10^4 DAP + 0,240144 \times 10^3 Ht$  | 94,36          |
| $Prod_{Hid} = -0,145784 \times 10^5 + 0,118364 \times 10^4 DAP + 0,190011 \times 10^3 Hc$  | 93,91          |
| $Prod_{Lig} = -0,642007 \times 10^5 + 0,564000 \times 10^4 DAP + 0,470170 \times 10^3 Ht$  | 94,23          |
| $Prod_{Lig} = -0,615817 \times 10^5 + 0,590775 \times 10^4 DAP + 0,246280 \times 10^3 Hc$  | 94,02          |
| $Prod_{Ext} = -0,182573 \times 10^5 + 0,753848 \times 10^3 DAP + 0,473344 \times 10^3 Ht$  | 82,29          |
| $Prod_{Ext} = -0,158845 \times 10^5 + 0,893938 \times 10^3 DAP + 0,344295 \times 10^3 Hc$  | 80,09          |
| $Prod_{Holo} = -0,184903 \times 10^6 + 0,118067 \times 10^5 DAP + 0,354484 \times 10^4 Ht$ | 94,17          |
| $Prod_{Holo} = -0,167904 \times 10^6 + 0,124776 \times 10^5 DAP + 0,285987 \times 10^4 Hc$ | 93,48          |

$Prod_{Ms}$  = produção em massa seca total (kg.ha<sup>-1</sup>);  $Prod_{Carb}$  = produção em carvão (kg.ha<sup>-1</sup>);  $Prod_{Hid}$  = produção em hidrogênio (kg.ha<sup>-1</sup>);  $Prod_{Lig}$  = produção em lignina (kg.ha<sup>-1</sup>);  $Prod_{Ext}$  = produção em extrativos (kg.ha<sup>-1</sup>);  $Prod_{Holo}$  = produção em holocelulose (kg.ha<sup>-1</sup>); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Ht = altura total (m); Hc = altura comercial (m); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%).

Pela Tabela 29 verifica-se que a qualidade de ajuste das equações foi satisfatória, fato demonstrado pelo alto coeficiente de determinação obtido para cada uma das equações. Porém, a partir da dispersão gráfica dos resíduos, observa-se uma relativa tendenciosidade de subestimativa dos valores. Essa dispersão, entretanto, está compreendida quase na sua totalidade entre 2 e -2 (Figura 7).

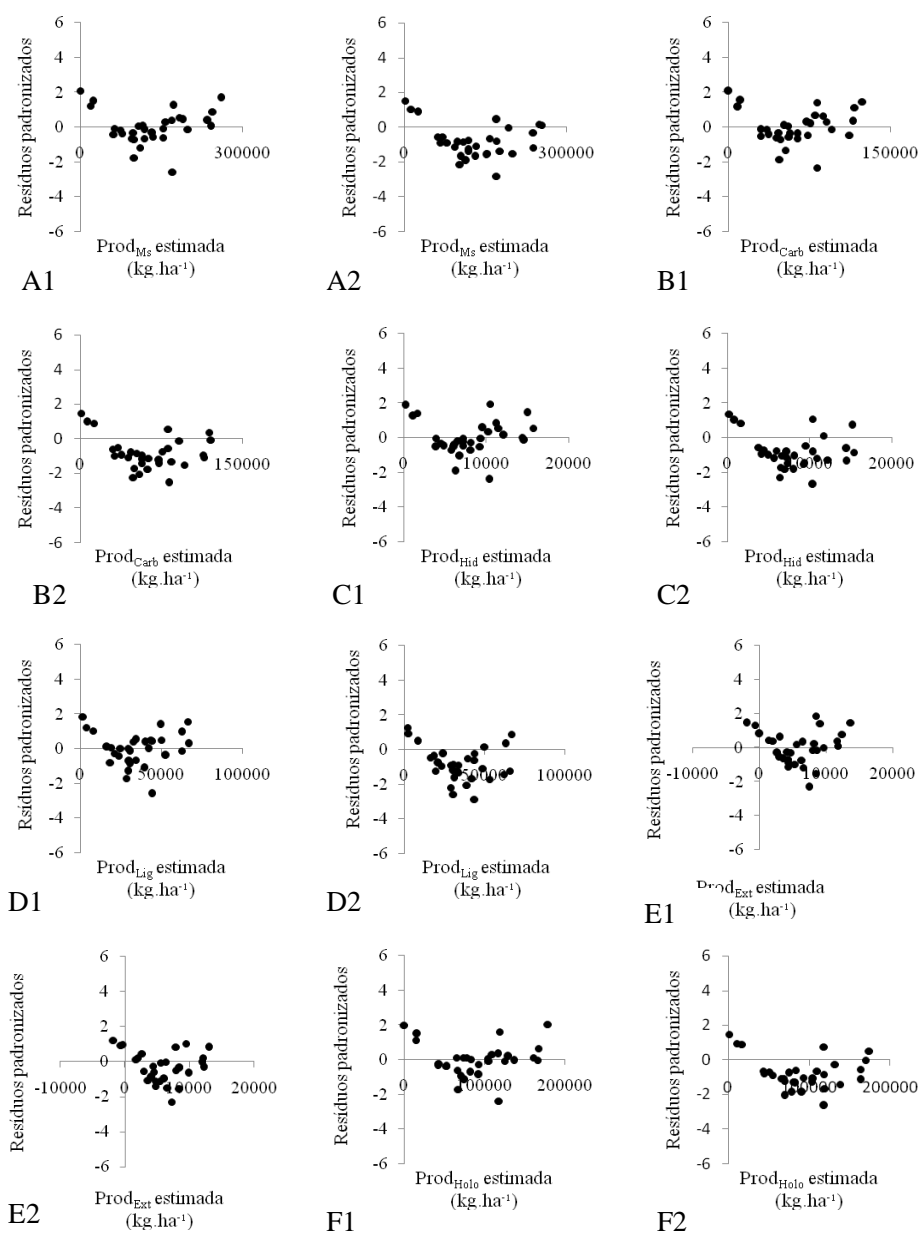


Figura 8 Distribuição dos resíduos dos modelos ajustados para estimar os valores de produção de massa seca total (A), de carbono (B), de hidrogênio (C), de lignina (D), de extrativos (E) e de holocelulose (F)

em função do DAP e da altura total (1) e em função do DAP e da altura comercial (2).

Na Tabela 30 encontra-se as equações ajustadas a partir do modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) na sua forma linear. Nota-se que as equações obtidas apresentam altos coeficientes de determinação, superior às equações ajustadas a partir dos modelos lineares múltiplos representados na Tabela 29. Além disso, a dispersão gráfica dos resíduos indicou que os erros apresentaram distribuição aleatória, sem tendenciosidade aparente e poucos dados discrepantes (Figura 8).

Semelhante à qualidade de ajuste apresentada neste trabalho, Soares e Oliveira (2002) obtiveram um coeficiente de determinação de 98,82% ao ajustar o modelo de Schumacher e Hall (1933) em sua forma linear para estimar a quantidade de carbono presente no fuste sem casca de quarenta árvores de *Eucalyptus grandis* aos 77 meses de idade. Já, Soares, Leite e Görgens (2005) obtiveram um coeficiente de determinação de 97,96% no ajuste deste mesmo modelo para a estimativa de carbono alocado na madeira de *Eucalyptus grandis* com idades entre 32 e 80 meses.

Tabela 30 Equações ajustadas a partir do modelo proposto por Schumacher e Hall para a estimativa dos valores de produção em função do DAP e da altura total

| Equações  | R <sup>2</sup> |
|---|----------------|
| $\text{Ln}(\text{ProMs}) = 0,228116 \times 10^1 + 0,222284 \times 10^1 \text{Ln}(\text{DAP}) + 0,101881 \times 10^1 \text{Ln}(\text{Ht})$   | 97,07          |
| $\text{Ln}(\text{ProCarb}) = 0,145707 \times 10^1 + 0,221791 \times 10^1 \text{Ln}(\text{DAP}) + 0,104899 \times 10^1 \text{Ln}(\text{Ht})$ | 96,85          |
| $\text{Ln}(\text{ProLig}) = 0,161928 \times 10^1 + 0,252321 \times 10^1 \text{Ln}(\text{DAP}) + 0,567205 \text{Ln}(\text{Ht})$              | 96,51          |
| $\text{Ln}(\text{ProHolo}) = 0,187938 \times 10^1 + 0,213920 \times 10^1 \text{Ln}(\text{DAP}) + 0,109727 \times 10^1 \text{Ln}(\text{Ht})$ | 96,54          |

Prod<sub>Ms</sub> = produção em massa seca total (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Carb</sub> = produção em carbono (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Lig</sub> = produção em lignina (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Ext</sub> = produção em extrativos (kg.ha<sup>-1</sup>); Prod<sub>Holo</sub> = produção em holocelulose (kg.ha<sup>-1</sup>); Ht = altura total (m); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação (%).



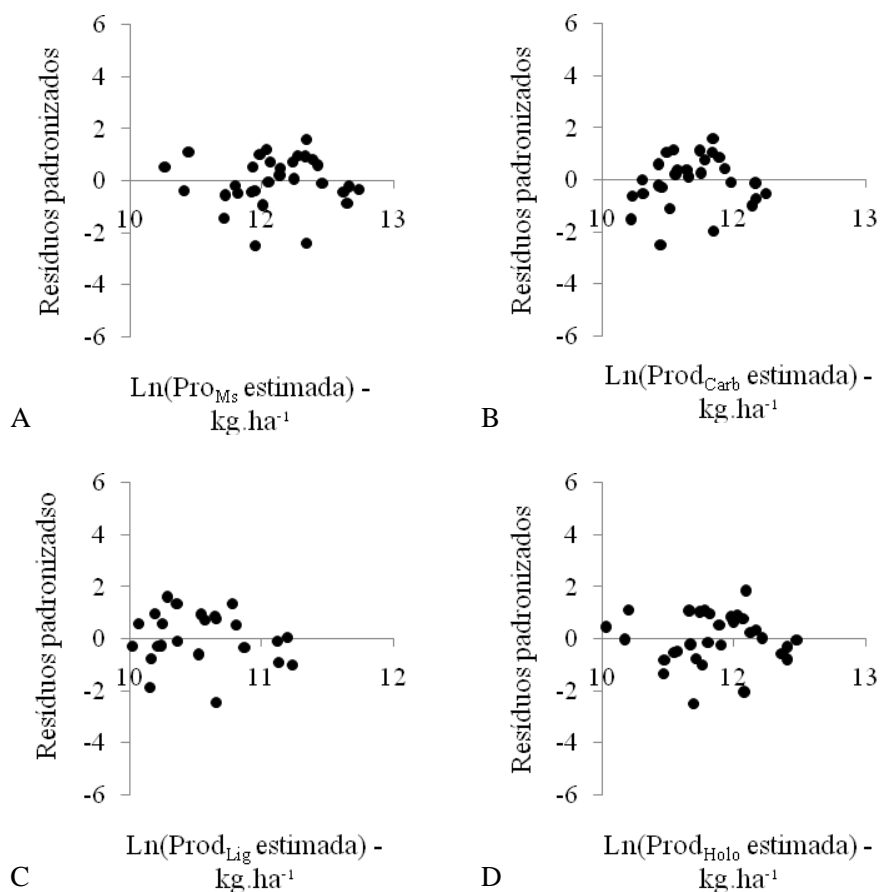


Figura 9 Distribuição dos resíduos das equações ajustadas a partir do modelo linearizado de Schumacher e Hall para estimar os valores de produção de massa seca total (A), de carbono (B), de lignina (C) e de holocelulose (D) em função do DAP e da altura total.

## 5 CONCLUSÃO

- Os altos coeficientes de variação encontrados para as seguintes características da madeira: teor de nitrogênio, extrativos e cinzas, provavelmente se deva aos diferentes sítios analisados dentro de cada idade.
- A idade não influenciou na porcentagem dos constituintes elementares, no poder calorífico superior e inferior e no teor de holocelulose, porém, influenciou nos valores de densidade básica, no teor de lignina, extrativos e cinzas e na densidade energética da madeira.
- Os diferentes sítios, possivelmente, influenciaram nos valores das características de crescimento das árvores e de produção de volume e biomassa, o que pode ser constatado em razão dos altos coeficientes de variação verificados dentro de cada idade para essas características.
- A idade não influenciou nos valores de DAP e de volume no incremento volumétrico e nos incrementos em massa seca, o que provavelmente tenha ocorrido em virtude da interferência dos diferentes sítios analisados dentro de cada idade. Entretanto, a altura e os valores de produção total sofreram interferência da idade, exceto a produção de lignina e de cinzas.
- As equações ajustadas para as características analisadas apresentaram altos coeficientes de determinação e a distribuição gráfica de resíduos indicou a presença de dados pouco discrepantes.
- No ajuste dos modelos para a estimativa dos valores de produção por meio das variáveis DAP e altura, as equações ajustadas a partir do modelo linearizado proposto por Schumacher e Hall (1933) apresentaram um maior coeficiente de determinação e uma distribuição gráfica dos resíduos com erros mais, uniformemente, distribuídos em comparação as equações ajustadas por meio de modelos lineares múltiplos.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. S. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.:** influência da idade e classe de produtividade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. 94 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF:** ano base 2012. Brasília, 2013. 148 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas técnicas ABTCP.** São Paulo, 1974. 6 p.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BARCELLOS, D. C. et al. O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 141-158, 2005.

BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 10, p. 61-72. 1978.

BIERMANN, C. J. **Handbook of pulping and papermaking.** 2nd ed. San Diego: Academic, 1996. 754 p.

BILLA, E. et al. Multivariate chemometric analysis of the fluorescence spectra of eucalyptus wood. **Industrial, Crops and Products**, Amsterdam, v. 11, p. 187-196, 2000.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

CARMEAN, W. H. Forest site quality evaluation in the United States. In: \_\_\_\_\_ **Advances in agronomy**. New York: Academic, 1975. v. 27, p. 209-269.

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: J. Wiley, 1983. 333 p.

ELDRIDGE, K. et al. **Eucalypt domestication and breeding**. Oxford: Claredon, 1993. 288 p.

FOELKEL, C. E. B. et al. Celulose kraft de madeiras juvenil e adulta de *Pinus elliottii*. **Boletim Informativo do IPEF**, Piracicaba, n. 12, p. 127-142, 1976.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley & Sons, 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.

GOUVEA, A. F. G. et al. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de Eucalyptus para produção de celulose Kraft. **Ciência da Madeira, Pelotas**, v. 3, n. 2, p. 102-115, 2012.

JANKOWSKY, I. P. **Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial**. Piracicaba: IPEF, 1979. p. 1-15. Circular Técnica, 81.

KUMAR, R. et al. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. **Journal of Forestry Research**, Amsterdam, v. 21, n. 4, p. 514-516, 2010.

LARSON, P. R. The physiological basis for wood specific gravity in conifers. **IUFRO Division**, Brisbane, v. 2, p. 672-680, 1973.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, p. 47-5, 2002.

MORAIS, P. H. D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa**. 2008. 79 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

NÚÑEZ-REGUEIRA, L.; AÑÓN, J. A. R.; CASTIÑEIRAS, J. P. Calorific values and flammability of forest species in Galicia Coastal and hillside zones. **Bioresource Technology**, Essex, v. 57, p. 283-289, 1996.

OLIVEIRA, G. M. V. et al. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, 2012.

PALMA, H. A. L.; LEONELLO, E. C.; BALLARIN, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 141-148, 2010. Suplemento.

PAULA, L. E. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

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.

QUILHÓ, T.; PEREIRA, H. Within and between-tree variation of bark content and wood density of *Eucalyptus globulus* in commercial plantations. **Iawa Journal**, Leiden, v. 22, n. 3, p. 255-265, 2001.

REIS, A. A. et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Incrementos anuais de volume, massa e idade ideal de corte para *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 32, p. 43-48, 1986.

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, MG, 2011.

ROCKWOOD, D. L. et al. Energy product options for *Eucalyptus* species grown as short rotation woody crops. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 9, n. 8, p. 1361-1378, 2008.

RUEL, K. et al. The wood cell wall at the ultrastructural scale - formation and topochemical organization. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v. 8, n. 2, p. 107-116, 2006.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético**. 2009. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANTANA, W. M. S. et al. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.

SANTOS, L. C. et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.

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, 2012.

SCHONAU, A. P. Problems in using vegetation or soil classification in determining site quality. **South African forestry journal**, Pretoria, v. 141, p. 13-8, 1987.

SCHULTZ, R. P. **Loblolly pine**: the ecology and culture of loblolly pine (*Pinustaeda* L.). Washington: USDA Forest Service, 1997. 514 p.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 453 p.

SENF, J. F.; BENDTSEN, B. A.; GALLIGAN, W. L. Weak wood: fast-grown trees make problem lumber. **Journal of Forrestry**, Washington, v. 83, n. 8, p. 476-485, 1985.

SETTE JÚNIOR, C. R. et al. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

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

SILVA, M. G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**. 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.

SMITH, W. R.; BRIGGS, D. G. Juvenile wood: has it come of age? **Forest Products Research Society**, Madison, v. 17, p. 5-11, 1986.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 711-718, 2005.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

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

SPURR, S. H.; BARNES, B. V. **Forest ecology**. 3<sup>th</sup> ed. New York: J. Wiley, 1980. 687 p.

SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: The Ronald, 1952. 476 p.

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



TRUGILHO, P. F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, 2009.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-11, 1996.

VALVERDE, S. R. et al. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. **Biomassa e Energia**, São Luiz do Paraitinga, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

ZOBEL, B. J. The changing quality of the world wood supply. **Wood Science and Technology**, New York, v. 18, n. 1, p. 1-17, Mar. 1984.