

**UMA NOVA METODOLOGIA DE
AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E DA
PRODUÇÃO DE *Eucalyptus* sp CLONAL PARA
FINS ENERGÉTICOS**

SAMUEL DE PÁDUA CHAVES E CARVALHO

2010

SAMUEL DE PÁDUA CHAVES E CARVALHO

**UMA NOVA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E
DA PRODUÇÃO DE *Eucalyptus* sp CLONAL PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Ph.D. Natalino Calegario

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

2010

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

Carvalho, Samuel de Pádua Chaves e.

Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da
produção de *Eucalyptus* sp clonal para fins energéticos / Samuel de
Pádua Chaves e Carvalho. – Lavras : UFLA, 2010.

103 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Natalino Calegario.

Bibliografia.

1. Manejo florestal. 2. Modelos generalizados. 3. Estatística
aplicada. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.928

SAMUEL DE PÁDUA CHAVES E CARVALHO

**UMA NOVA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E
DA PRODUÇÃO DE *Eucalyptus* sp CLONAL PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 01 de fevereiro de 2010.

Prof. Dr. Fabyano Fonseca e Silva (Co-orientador)

UFV

Prof. Dr. Luis Antônio Coimbra Borges

UFLA

Prof. Ph.D. Natalino Calegario

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

AGRADECIMENTOS

A Deus sobre todas as coisas.

Aos meus pais Toninho e Consola e às minhas irmãs Danila e Nayhana, por seu amor incondicional e incentivo constante.

À Universidade Federal de Lavras, por minha formação como Bacharel e Mestre em Engenharia Florestal.

Ao professor e orientador Natalino Calegario, pelos cinco anos de convivência, ensinamentos e oportunidade de concretização de mais uma etapa em minha trajetória acadêmica e também ao professor Fabyano Fonseca e Silva da Universidade Federal de Viçosa, pela co-orientação.

Aos professores do Departamento de Ciências Florestais e do Departamento de Ciências Exatas da UFLA por sua grande contribuição em minha formação profissional.

Aos funcionários e secretárias do DCF/UFLA, em especial a Rose e Chica, pela disponibilidade para ajudar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) por tornar viável a realização deste trabalho através de concessão da bolsa de estudos.

À empresa Vallourec & Mannesmann Florestal pela concessão dos dados e apoio técnico disponibilizado, em especial ao Engenheiro Florestal Fernando Fischer.

Ao amigo e companheiro de República Alisson “Janú”, pelos momentos de diversão e horas de estudos compartilhadas.

Aos amigos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, em especial aos parceiros de laboratório Rômulo, Adriano, Ayuni, Michele e Nory.

A Mariana, pelo incentivo, amizade e horas de descarrego.

Aos amigos de Lavras, em especial a Dona Maria, Máisa, Dona Marlene e Dona Nina.

A Cris Carvalho, pelos momentos de conversas online sobre as fases de um mestrando em momentos de dissertação.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, o meu muito OBRIGADO!!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO GERAL	i
GENERAL ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução geral	2
2 Revisão de literatura	4
2.1 O gênero <i>Eucalyptus</i>	4
2.2 Relação hipsométrica	4
2.3 Volumetria e afilamento das árvores	6
2.4 Sítios florestais.....	10
2.5 Modelagem da densidade básica da madeira	12
2.6 Poder calorífico superior da madeira	13
2.7 Modelos de crescimento e produção florestal.....	14
3 Referências Bibliográficas	17
CAPÍTULO 2.....	24
Desenvolvimento de um sistema de modelagem aplicado no crescimento e produção de <i>Eucalyptus</i> sp clonal.....	24
1 Resumo	25
2 Abstract.....	26
3 Introdução	27
4 Materiais e Métodos.....	29
4.1 Caracterização da área de estudo e dos dados	29
4.2 Modelo de relação hipsométrica	30
4.2.1 Sigmoidal logístico de três parâmetros completo	30
4.3 Classificação de sítio	31
4.3.1 Modelo proposto	32
4.4 Modelagem da variância e da autocorrelação dos resíduos	34
4.5 Projeção da área basal.....	35
4.6 Estimativa do volume por árvore individual.....	36
4.7 Modelagem do crescimento e produção volumétrica	37
4.8 Avaliação da qualidade de ajuste dos modelos.....	39
4.8.1 Erro padrão residual e percentual	39
4.8.2 Critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação Bayesiano (BIC)	39
4.8.3 Teste da razão da máxima verossimilhança (TRMV).....	39
5 Resultados e Discussões	41
5.1 Modelo hipsométrico	41
5.2 Classificação de sítio	44

5.3	Projeção da área basal.....	49
5.4	Volume árvore individual.....	51
5.5	Crescimento e produção volumétrica.....	52
5.6	Aplicação do procedimento.....	55
6	Conclusões.....	58
7	Referências Bibliográficas.....	59
CAPÍTULO 3.....		61
Modelagem do perfil, densidade, massa e crescimento em energia para <i>Eucalyptus</i> sp com fins energéticos.....		61
1	Resumo.....	62
2	Abstract.....	63
3	Introdução.....	64
4	Materiais e Métodos.....	66
4.1	Caracterização da área de estudo.....	66
4.2	Coleta e geração dos dados para determinação da densidade e do poder calorífico.....	66
4.3	Modelagem do perfil.....	70
4.4	Modelagem da densidade por árvore individual.....	72
4.5	Estimativa da massa por árvore individual.....	74
4.6	Estimativa do estoque energético por árvore individual.....	76
4.7	Modelagem da variância para dados heterocedásticos.....	77
4.8	Modelagem do crescimento e da produção calorimétrica.....	78
5	Resultados e Discussões.....	81
5.1	Modelagem do perfil.....	81
5.2	Modelagem da densidade.....	85
5.3	Estimativa do estoque energético por árvore individual.....	91
5.4	Modelagem do crescimento e produção calorimétrica.....	94
5.5	Aplicação do procedimento na construção de tabelas de projeção do crescimento e da produção calorimétrica em gigacalorias por hectare.....	98
6	Conclusões.....	101
7	Referências Bibliográficas.....	102

RESUMO GERAL

CARVALHO, Samuel de Pádua Chaves e. **Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de *Eucalyptus* sp clonal para fins energéticos.** 2010. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O presente trabalho tem como objetivo propor uma nova visão metodológica no manejo de florestas com finalidade de se obter o carvão vegetal como produto final. Por meio dos dados disponibilizados pela empresa Vallourec & Mannesmann Florestal foi possível desenvolver este estudo estruturado em três capítulos. O capítulo 1 consiste numa revisão bibliográfica dos temas relacionados à relação hipsométrica, “*taper*” das árvores, volumetria, sítios florestais, modelagem da densidade básica, poder calorífico da madeira e modelos de crescimento e produção florestal. O capítulo 2 é constituído de uma proposta no processamento do inventário florestal, fundamentado na teoria dos modelos não lineares clássicos e generalizados. Conclui-se que apenas através da utilização de recursos computacionais aplicados no ajuste de modelos conseguiu-se uma expressiva melhoria na precisão e na redução do número de modelos a serem utilizados no processamento do inventário florestal. O capítulo 3 propõe uma nova metodologia para o manejo de florestas com fins energéticos, com base na modelagem do perfil, massa, densidade, crescimento e produção em estoque energético. Com base nas técnicas de modelagem de regressão mista foi possível conseguir melhorias nas estimativas de até 50% quando comparada aos ajustes tradicionais de regressão fixa. Conclui-se que os modelos propostos apresentaram alto grau de parcimônia, precisão e boa performance, podendo ser aplicados dentro e fora da base de dados que os gerou, principalmente para os biológicos não lineares que possuem parâmetro assintótico em sua constituição, retratando as leis biológicas de crescimento. Conclui-se também que a rotação silvicultural é de 6 anos quando baseada em crescimento e produção calorimétrica para toda variação de sítio.

¹Orientador: Ph.D. Natalino Calegario – UFLA.

GENERAL ABSTRACT

CARVALHO, Samuel de Pádua Chaves e. **Growth and yield of clonal *Eucalyptus* sp for energy applications: a proposed new approach.** 2010. 103 p. Dissertation (Master in Forest Engineer) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

This paper proposes a methodological approach in forest management aimed at obtaining charcoal as the final product. This study is structured in three chapters and it uses data made available by the company Vallourec & Mannesmann Florestal. Chapter One consists of a bibliographic revision on topics related to hypsometry, tree “taper”, volumetry, forest sites, model for basic density, wood calorific value and forest models of growth and production. Chapter Two proposes a forest inventory processing system based on classic and generalized non-linear models. It was concluded that only through the use of computing resources applied to model adjustment it was possible to obtain a significant improvement in precision and in reduction of models used for forest inventory data processing. Chapter Three suggests a methodological approach to forest management for energy production based on profile modelling, mass, density, growth, and on the production of energy stocks. Based on a mix of regression model techniques, it was possible to obtain significant estimate gains up to 50% in comparison to more traditional adjustment procedures when applying the fixed regression model. Thus, the models proposed in this study presented a high degree of parsimony, precision and high performance, which allow their application irrespective of the database, especially for the non-linear biologic models with asymptotic parameters such as, for instance, biological growth expectations. It was observed that the silvicultural rotation period is around six years when growth and calorimetric production are considered across site range of variation.

¹Adviser: Ph.D. Natalino Calegario – UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Com a participação em torno de 4% do PIB nacional perfazendo um total US\$ 21 bilhões e com três setores em destaque: celulose e papel (US\$ 7 bilhões), siderurgia a carvão vegetal (US\$ 4,2 bilhões) e madeira e móveis (US\$ 9,3 bilhões), é indiscutível a importância do setor florestal na economia brasileira (Ladeira, 2002). Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2009), como espécies mais plantadas no Brasil citam-se dois gêneros de maior significância: o *Eucalyptus*, e o *Pinus* com aproximadamente 4.258.704 ha e 1.867.680 ha de área plantada respectivamente. Em termos de produtividade, espera-se que até 2010 se produza em média, $55 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, com um ciclo produtivo reduzido para 5,5 anos (Ladeira, 2002).

A eucaliptocultura é destaque como uma das principais representantes do setor florestal brasileiro, devido ao seu rápido crescimento, melhoramento genético, técnicas silviculturais e desenvolvimento de técnicas de aproveitamento mais nobre da madeira. Dentre os múltiplos usos possíveis de obtenção das árvores de *Eucalyptus*, estão: energia, celulose e papel, produção de móveis, construção civil, laminação, compensados, chapas de fibras, placas de OSB, moirões, postes, dormentes, óleos essenciais, entre outros usos.

Com a limitação cada vez maior dos recursos florestais disponíveis, o eucalipto se torna a cada dia uma cultura indispensável para abastecer o setor florestal. Portanto, torna-se necessário o uso de métodos de aproveitamento destes recursos de maneira mais eficaz (Sternadt, 2001). Uma das maneiras de tornar mais eficiente o uso dos recursos florestais é fazer uso de espécies potenciais e a aplicação e escolha de modelos capazes de tornar as estimativas bem próximas do real. A escolha e aplicação de modelos estatísticos são de fundamental importância, pois devem permitir ao manejador florestal a realização de estimativas acuradas, tornando o planejamento mais eficaz.

A utilização de modelos para representação e explicação de uma realidade essencialmente mais complexa constitui estratégia de grande valia para o desenvolvimento da ciência, nos diferentes campos de conhecimento (Hasenauer, 2000). Em sua maioria, as empresas florestais possuem como foco principal a quantificação do volume, sendo assim torna-se necessário buscar o desenvolvimento de modelos e métodos que visem à máxima redução dos erros envolvidos neste processo para tornar os planejamentos mais eficazes.

Com o avanço tecnológico da informática, torna-se possível fazer ajustes de modelos cada vez mais complexos, os quais permitem contemplar, por exemplo, efeitos de covariantes, de funções heterogeneidade de variâncias e de autocorrelações temporais, além de possibilitarem a adição de efeitos aleatórios, fato este que caracteriza a teoria dos modelos mistos. Estes efeitos aleatórios são úteis para descrever aspectos genéticos e outras fontes de variação importantes, porém o processo de estimação inerente a eles demanda a utilização de técnicas estatísticas mais elaboradas.

Vista a importância no desenvolvimento de métodos estatísticos cada vez mais precisos que auxiliem o planejamento de um empreendimento florestal. Assim sendo, o presente trabalho estrutura-se em três capítulos e tem como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema de modelagem para florestas com fins energéticos. O capítulo 1 apresenta uma revisão de literatura sobre os temas levantados neste estudo. O capítulo 2 é constituído de uma proposta de processamento do inventário florestal baseada em modelos não lineares clássicos e generalizados. O capítulo 3 propõe uma nova metodologia para o manejo de florestas com fins energéticos, com base na modelagem do perfil, massa, densidade, crescimento e produção calorimétrica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O gênero *Eucalyptus*

Atualmente há um aumento da fiscalização na tentativa de reduzir as pressões sobre as florestas nativas, mas por outro lado o consumo de madeira é crescente. Com isso, o gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, é uma alternativa viável para abastecer este mercado devido, principalmente, ao seu rápido crescimento e às tecnologias silviculturais já desenvolvidas para sua produção.

A definição da espécie a ser plantada é a primeira etapa de um projeto de reflorestamento, levando-se em consideração o objetivo da produção (uso da madeira) e as condições edafoclimáticas (solo e clima) da região. Cada espécie se desenvolve em um ambiente adequado e por isso é indicado, sempre que possível, realizar testes para averiguar a adaptação do material ao ambiente, tanto para sementes quanto para clones. Entretanto, se não for possível a realização de testes, e tampouco houver dados experimentais da região, sugere-se que a escolha do material genético seja feita a partir de procedências cujas condições de origem sejam semelhantes ao local do plantio, sobretudo latitude, altitude, temperatura média anual, precipitação média anual, déficit hídrico e tipos de solos (Angeli et al., 2005).

O mesmo autor ainda sugere que as espécies sejam escolhidas segundo seus usos.

2.2 Relação hipsométrica

É definida como a relação existente entre o diâmetro medido a 1,30 m do solo (DAP) e a altura das árvores. Esta relação é de grande interesse nas atividades de inventário florestal visto que o custo de medição de altura é alto e sua obtenção tende a tornar os inventários florestais mais lentos.

Em inventário florestal é comum medir o DAP de todas as árvores da

unidade amostral e a altura de parte delas. Estes pares de diâmetro e altura formam a base de dados para se proceder o ajuste de modelos. O conjunto desses dados é utilizado para se ajustar uma equação de altura em função do diâmetro, a qual será usada para estimar as alturas das demais árvores da parcela. Esta modelagem torna os trabalhos de inventários mais práticos e econômicos.

Por se tratar de estimativas é preciso escolher sempre modelos que retratem a verdadeira realidade dos dados. Plácido et al. (2004) e Soares et al. (2004) comentam que a grande dificuldade da escolha do melhor modelo para representar a relação hipsométrica deve-se à não linearidade da relação entre as variáveis envolvidas e as restrições impostas aos parâmetros dos modelos, por razões biológicas.

Ao avaliarem 19 modelos dentre os quais o modelo não linear de Chapman & Richards na relação hipsométrica para *Acacia mearnsii*, com diferentes idades, Caldeira et al. (2002) concluíram que o modelo que melhor se ajusta para tal situação foi o modelo log da variável dependente em função do inverso da variável independente, ou seja, há uma tendência de não linearidade para relação hipsométrica.

Diversos são os fatores que influenciam na relação hipsométrica em que se pode citar: idade, sítio, densidade, posição sociológica, comprimento de copa (Scolforo, 2005). Atualmente, é possível inserir tais efeitos no ajuste de modelos mais elaborados. Ao avaliar o efeito da idade com heterogeneidade de variância e auto correlação, Calegario et al. (2005a) verificaram uma melhoria expressiva no ajuste dos modelos de relação hipsométrica, em que os resíduos tenderam a uma melhor distribuição e aumentando também o valor do log da máxima verossimilhança, implicando melhorias estatisticamente significativas. Trabalhos semelhantes podem também ser encontrados em Carvalho et al. (2008) e Guimarães et al. (2009).

2.3 Volumetria e afilamento das árvores

A cubagem rigorosa é o método direto de estimação do volume de árvores abatidas em campo mais utilizado na rotina de inventários florestais.

O método absoluto e o método relativo são as formas mais comuns para obtenção do volume das árvores em uma cubagem rigorosa. Dentre os absolutos, destacam-se o método de Smalian, Huber e Newton. Quanto aos relativos, citam-se os métodos de Hohenald e FAO.

Uma nova proposta metodológica para se estimar o volume das árvores foi feita recentemente por Leite & Andrade (2002) e denominada método geométrico ou da altura relativa. O método foi desenvolvido e testado em povoamentos de *Pinus* e *Eucalyptus* e mais recentemente na estimativa do volume comercial de angico branco (Carvalho, 2007). Baseia-se no afilamento das plantas tomando como base três coeficientes angulares ao longo do fuste das árvores.

Segundo Scolforo (2005), a estimativa do volume das árvores em povoamentos florestais é atividade corriqueira na área de biometria, inventário, manejo, economia e planejamento florestal. Sendo assim, a busca de métodos e modelos mais precisos, é desejável, pois é de acordo com estas estimativas volumétricas que são feitas as extrapolações para um povoamento florestal.

Veiga (1984) afirma que as equações para determinação do volume sólido de essências florestais são de uso geral e indispensável na silvicultura. Como todas elas são empíricas, faz-se necessário ajustá-las com frequência para adaptá-las a diferentes espécies, idades, espaçamentos e regiões. As equações volumétricas mais difundidas no setor florestal são:

a) Spurr:

$$V_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i^2 H_i + \varepsilon_i$$

b) Stoaate:

$$V_i = \beta_0 + \beta_1 DAP_i^2 H_i + \beta_2 DAP_i^2 + \beta_3 H_i + \varepsilon_i$$

c) Schumacher & Hall

$$V_i = \beta_0 . DAP_i^{\beta_1} . H_i^{\beta_2} . \varepsilon_i$$

d) Schumacher & Hall linearizado:

$$\ln V_i = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln DAP_i + \beta_2 \ln H_i + \ln \varepsilon_i$$

As equações de volume, cujos modelos incluem como variável independente a altura e o DAP da árvore, são mais gerais, podendo abranger, principalmente, diferentes sítios e idades, ou seja, tem de se estimar uma equação por sítio e idade, ou incluir ambos os efeitos no processo de modelagem, através de técnicas mais sofisticadas de ajuste.

Ao ajustarem diferentes modelos em plantios de eucalipto na região de Suzano – SP, para a obtenção de volume com e sem casca para celulose Couto & Bastos (1987) verificaram que o melhor modelo de ajuste foi o de Spurr. Na avaliação de diferentes metodologias -- dentre elas equações de volume, funções de afilamento e o método da altura relativa para se estimar o volume comercial de *Anadenanthera colubrina* -- Carvalho (2007) verificou que, entre os modelos propostos, o de Stoaate apresentou melhor qualidade de ajuste nas estimativas.

Segundo Scolforo (2005) pode-se chamar função de afilamento, ou de forma, ou de “*taper*” uma maneira de descrever matematicamente o perfil de um tronco. Uma das formas de se estudar a forma das árvores, é modelando-a. Dentre estas, destacam-se os modelos de perfil, os quais estimam o diâmetro a uma determinada altura do tronco, a altura comercial relativa a um diâmetro

mínimo de uso, bem como o volume parcial ou total do fuste, via integração das áreas seccionais do tronco (Husch et al., 1972).

No Brasil, tradicionalmente, estudos de perfil do tronco de árvores se baseiam em equações que permitem estimar o diâmetro ou raio em qualquer altura ao longo do tronco como os estudos de Guimarães & Leite (1992), Figueiredo Filho et al. (1996), Schneider et al. (1996), Silva et al. (1997), Assis et al. (2001), Fischer et al. (2001), Chichorro et al. (2003) e Mendonça et al. (2007). Atualmente, tendo em vista a obtenção de múltiplos produtos de uma floresta, estudos têm sido realizados visando à estimativa da altura em qualquer parte do tronco em função do diâmetro ou raio, sendo que normalmente são valores mínimos de diâmetros mínimos que restringem o uso comercial de um produto ou tora. Trabalhos com tal modelagem podem ser encontrados em Calegario (2002) e Pires (2004).

Exemplos de modelos que representem o “*taper*” das árvores são dados por:

a) Linear

- Polinômio de 5º grau de Schöepfer (1966)

$$\frac{d_{ij}}{dap_j} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_{ij}}{HT_j} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_{ij}}{HT_j} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_{ij}}{HT_j} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_{ij}}{HT_j} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_{ij}}{HT_j} \right)^5 + \varepsilon_{ij}$$

b) Não Linear:

- Demaerschalk (1972)

$$\left(\frac{d_{ij}}{DAP_j} \right)^2 = 10^{2\beta_0} DAP_j^{2\beta_1-2} (HT_j - h_{ij})^{2\beta_2} HT_j^{2\beta_3} + \varepsilon_{ij}$$

c) Não Linear Sigmoidal Logístico de 3 parâmetros

$$h_{ij} = \frac{\phi_1}{1 + \exp\left(\frac{\phi_2 - di}{\phi_3}\right)} + \varepsilon_{ij}$$

De acordo com Scolforo (2005), o modelo de Demaerschalk (1972) foi o primeiro modelo a apresentar compatibilidade entre volume total proveniente da soma dos volumes parciais, calculados por uma função de afilamento.

Ao aplicar diferentes funções de afilamento para retratar o perfil de *Pinus elliotti* localizados na região nordeste do Estado do Paraná, Scolforo et al. (1998) verificaram que a equação de afilamento de Amateis e Burkhart e as equações polinomiais apresentaram estimativas acuradas do diâmetro ao longo do fuste a partir da primeira tora padrão; caso o objetivo for a estimativa acurada do diâmetro, mas sem uniformidade nestas ao longo do perfil do fuste, então o polinômio de potência fracionária deve ser o recomendado, seguido pela equação de afilamento de Amateis e Burkhart e pelo polinômio do quinto grau.

De acordo com Rios (1997), com o avanço das técnicas de informática, é possível trabalhar com modelos mais complexos para estimar perfil de fuste, como por exemplo, modelos polinomiais, modelos polinomiais segmentados, modelos sigmoidais. Mais ainda, é possível fazer análises cada vez mais complexas, como por exemplo, modelos não lineares sigmoidais de efeito misto, no ajuste do perfil de árvores. Com este tipo de modelagem, é possível inserir nos modelos os mais diversos fatores que possam afetar a estimativa do perfil, tais como: idade, espécie / clone, densidade, sítio, dentre outras.

2.4 Sítios florestais

Alguns conceitos e terminologias devem ser considerados quando se trata de sítios florestais, quais sejam o próprio conceito de sítio, qualidade do sítio e a produtividade de um sítio florestal. Skovsgaard & Vanclay (2008) definem tais termos como:

- ✓ Sítio é um local geográfico considerado homogêneo em relação aos fatores ambientais (físicos e biológicos);
- ✓ Qualidade do sítio refere-se a uma combinação de fatores biológicos e físicos que caracterizam um sítio e que envolvem uma caracterização descritiva;
- ✓ Produtividade de um sítio é uma estimativa quantitativa do potencial de um sítio para produção de biomassa, ou seja, capacidade de um local de produzir madeira.

Segundo Scolforo (1993), a qualidade de um sítio florestal pode ser avaliada por métodos diretos e indiretos. A classificação indireta é feita por atributos que constituem o local, como: uso de plantas indicadoras, fatores edáficos, topográficos e climáticos e relações interespecíficas. Em relação à classificação direta, o mesmo autor afirma que o crescimento da floresta é mensurado diretamente. Fatores relacionados aos métodos diretos podem ser por meio do registro histórico de uso da terra, do volume e área basal do povoamento e por crescimento periódico em altura.

Em termos de produtividade, esta é quantificada por índices ou classes de sítio. Índice de sítio expressa a produtividade local em termos quantitativos, expresso pela altura média das árvores dominantes e codominantes, numa idade de referência, considerada normalmente como a idade de rotação silvicultural.

Segundo Assmann (1970), o conceito de altura dominante se refere à média das alturas das 100 árvores de maior DAP por hectare, sendo esta a

definição mais usual no meio florestal. Segundo Schneider & Finger (1993), esta variável dendrométrica não é afetada por intervenções do homem, como o desbaste, por exemplo. Campos et al. (1985) afirmam que a maneira mais adequada de se expressar o índice de sítio é relacionando a altura média das árvores dominantes com a idade e afirma ainda que o crescimento das árvores dominantes não é afetado pela competição das árvores de outras categorias.

Assim como a idade, o sítio é a variável que mais afeta qualquer sistema de modelagem da produção, sendo necessária sua classificação antes de se partir para predições de variáveis em níveis de planejamento, como predições volumétricas, de biomassa, entre outras. Trabalhos que envolvem modelos para classificação de sítios florestais foram realizados por Batista & Couto (1986), em que estes desenvolvem curvas de sítio baseadas em análises de influência ambiental; Calegario et al. (2005b) que desenvolve um sistema de modelagem de altura dominante via modelos generalizados de efeitos misto; Scolforo & Machado (1988a,b) que desenvolveram trabalhos relacionados em construções de curvas de índice de sítio para o gênero *Pinus* no estado do Paraná e Santa Catarina e concluíram que o modelo biológico de Chapman e Richards é o que apresenta melhor desempenho, sendo este expresso por:

$$\bar{H}dc_i = A[1 - \exp(K * I_i)]^m + \varepsilon_i$$

Sendo: $\bar{H}dc$ = altura média das árvores dominantes e codominantes da *i*-ésima unidade amostral; A = parâmetro assintótico; K = parâmetro de escala; I = idade da *i*-ésima unidade amostral; m = parâmetro que indica o ponto de inflexão da curva; ε_i = erro aleatório.

2.5 Modelagem da densidade básica da madeira

A tendência das empresas do setor de celulose e energia é o desenvolvimento de modelos que gerem predições de valores de massa, quantidade de celulose e carvão e, mais recentemente, estoque de carbono. O desenvolvimento de metodologias que propiciem inferir sobre a densidade da madeira possibilitará aos profissionais ligados ao inventário florestal fazer, não apenas estimativas volumétricas, mas também em massa e rendimento industrial (Scolforo, 2005). Esta visão tende a impactar toda uma cadeia produtiva, visto que a fonte de matéria prima para estes setores é a floresta.

Diversas são as maneiras de se obter a densidade básica da madeira, dentre as quais estão os métodos destrutivos e os não destrutivos. Um exemplo de método não destrutivo é o uso do instrumento “pilodyn” que caracteriza a dureza da penetração do aparelho na árvore com sua densidade, ou seja, relaciona a profundidade de penetração de uma agulha de aço injetada a uma força constante na árvore, com a densidade da madeira (Cown, 1978, 1979). Recentemente, têm sido desenvolvidos e ajustados aparelhos com tecnologias de ponta para determinação da densidade da madeira como o NIR, que obtém os valores da densidade da madeira em corpos de prova por valores de emissão de ondas próximas do infra vermelho. Ao avaliarem a precisão do método NIR (near infra red) aplicada na estimativa da densidade básica de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, Hein et al. (2009) concluíram que o método é totalmente aplicável, devido a sua alta precisão e o pouco tempo demandado para análises quando comparado ao método tradicional de obtenção da densidade básica da madeira.

Por meio da obtenção das mais diversas formas da densidade da madeira, torna-se necessária a sua modelagem para que se possam fazer extrapolações para todo um empreendimento. Segundo Franco (1996), a biomassa total e comercial para *Eucalyptus camaldulensis* é estimada com precisão por uma

equação de dupla entrada e ainda que há uma tendência de aumento da densidade no sentido base-topo e com a idade. Rufini (2008) ao trabalhar com ajuste de diferentes modelos para peso de matéria seca, já citados na literatura, verificou que para regiões de cerrado na bacia do São Francisco, os modelos de Schumacher e Hall e de Spurr logaritmizados foram os que apresentaram melhores estimativas. A autora concluiu que há um aumento do peso de matéria seca com aumento da classe diamétrica. Outros trabalhos que envolvem a modelagem da densidade da madeira podem ser encontrados em Thiersch (2002), Camolesi (2007) e Trugilho (2009).

2.6 Poder calorífico superior da madeira

Em se tratando de materiais combustíveis, como é o caso da madeira, o poder calorífico é tido como a característica mais importante (Corder, 1973). Segundo Cintra (2009), este representa a quantidade de calor liberado durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível, expresso em caloria por grama ou quilocaloria por quilograma.

Existem duas maneiras de se expressar o poder calorífico de um combustível, sendo o poder calorífico superior e o inferior. Cintra (2009) afirma que no poder calorífico superior a água formada durante a combustão -- na reação entre o hidrogênio elementar da madeira e o oxigênio -- é condensada e seu calor latente é recuperado e então somada à energia mensurada, sendo que no poder calorífico inferior o calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor. Em termos de pesquisa e comparação de combustíveis, o mesmo autor diz que o poder calorífico superior é mais usual.

Muitos são os trabalhos que envolvem a obtenção do poder calorífico de diferentes espécies florestais tanto nativas como plantadas. Quirino et al. (2005) ao revisarem na literatura sobre diferentes espécies florestais tropicais exóticas e nativas, disseram que os valores de poder calorífico em média é de 4732 kcal/kg

variando de 3350 a 5260 kcal/kg. Ao avaliarem valores de poder calorífico em diferentes níveis de adubação para *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, Vale et al. (2000) verificaram que para o eucalipto e para a acácia os valores de poder calorífico superior são em média 4641 kcal/kg e 4619 kcal/kg respectivamente, estando estes também numa faixa de valores semelhantes aos encontrados por Howard (1973) e Brito (1993). Em se tratando da comparação de características anatômicas da madeira, alguns autores como Doat & Petroff (1975) e Ferrari (1988) afirmam que não há correlação significativa entre o poder calorífico superior e a densidade da madeira.

2.7 Modelos de crescimento e produção florestal

Pode-se dizer que há duas abordagens referentes aos estudos que envolvem a modelagem da dinâmica de floresta (Gomes & Varriale, 2004). Os modelos descritivos fundamentados em regressões e modelos de correlação e os modelos de caráter explanatório ou baseados em processos. Os modelos baseados em processos levam em consideração fatores que determinam a evolução de um sistema, ou seja, levam em consideração fatores relacionados ao meio que futuramente poderá intervir na produção de madeira, frutos, etc, como: processos ecofisiológicos, edafoclimáticos, temperatura, taxa fotossintética entre outros.

Um exemplo de modelo de caráter explanatório citado por Gomes & Varriale (2004) é o modelo TREEDYN 3. Este possui como características os fatores que influenciam a fotossíntese, a fenologia e os processos edáficos, envolvendo 14 variáveis de influência.

De uma maneira geral, pode-se dizer que os modelos baseados em estatísticas de regressão são os mais usuais em se tratando da modelagem do crescimento e produção em florestas para produção. Daniel et al. (1979) generaliza os fatores de crescimento em povoamentos puros sendo afetados pela

idade, qualidade do sítio, espécie, densidade em termos de área basal e números de plantas por hectare e técnicas silviculturais.

Segundo Davis & Johnson (1987), o crescimento e produção de um povoamento está relacionado às características locais, mas que estas podem ser mudadas com correção do solo quanto a sua química e estrutura, através da irrigação, entre outras. Daniel et al. (1979) e Davis & Johnson (1987) afirmam que é possível verificar que o suporte para o desenvolvimento de uma floresta é fornecido pelo local onde esta é instalada, mas, com alterações antrópicas, é possível aumentar ou melhorar seu desenvolvimento. Os modelos de crescimento e produção baseados em informações de parcelas permanentes remedidas no tempo, tornam-se uma ferramenta para predizer de uma forma geral quanta madeira pode-se retirar de um determinado local. De acordo com Curtis & Hyink (1984), em se tratando de formulações de modelos de crescimento e produção, as parcelas permanentes constituem na maior fonte de informações sobre uma floresta submetida a um dado tratamento.

Clutter (1963) trabalhou o desenvolvimento do modelo de Schumacher (1939) baseado em conceitos de equações diferenciais, compatibilizando um modelo de crescimento e produção com um modelo de densidade variável, em que a taxa de crescimento é expressa pela derivativa do modelo e o acúmulo dado pela integralização, mais detalhes deste procedimento podem ser obtidos em Clutter et al. (1983) e Scolforo (2006).

Scolforo (2006) classifica os modelos de crescimento e produção em: modelos nível povoamento global para povoamentos desbastados ou não, modelos por classe diamétrica e para árvores individuais. Em se tratando de modelos nível povoamento, a variável de interesse seja ela volume, biomassa, peso de matéria seca, entre outras, é obtida tendo como base informações relacionadas ao povoamento em geral, como: idade, sítio e uma medida de densidade, como, por exemplo, mortalidade, área basal. Em modelos por classe

diamétrica, estes são fundamentados em distribuições de probabilidade, em que são geradas saídas por classe de diâmetro com a finalidade principal de se obter múltiplos produtos da floresta.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELI, A.; BARRICHELO, L. E. G.; MÜLLER, P. H. **Indicações para escolha de espécies de *Eucalyptus***. Piracicaba: IPEF, 2005. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp>>. Acesso em: 15 out. 2009.

ASSIS, A. L. de; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de; ACERBI JÚNIOR, F. W.; OLIVEIRA, A. D. de. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 20-40, jan./jun. 2001.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York: Pergamon, 1970. 506 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2009 ano base 2008**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 10 nov. 2009.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. Escolha de modelos matemáticos para construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus* sp no estado de São Paulo. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 32, p. 33-42, set. 1986.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6.; CONGRESSO FLORESTAL PAN AMERICANO, 1., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS, 1993. p. 280-282.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; SCHEEREN, L. W.; BARICHELLO, L. R.; WATZLAWICK, L. R. Relação hipsométrica para *Acacia mearnsii* com diferentes idades. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 45, p. 57-68, jul./dez. 2002.

CALEGARIO, N. **Modeling eucalyptus stand growth base don linear and nonlinear mixed-effects models**. 2002. 123 p. Thesis (Doctor of Philosophy in Forest Science) - University of Georgia, Georgia.

CALEGARIO, N.; CALEGARIO, C. L. L.; MAESTRI, R.; DANIELS, R. F. Melhoria da qualidade de ajuste de modelos biométricos florestais pelo emprego da teoria dos modelos não lineares generalizados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p. 38-50, dez. 2005.

CALEGARIO, N.; DANIELS, R. E.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal Eucalyptus plantation case study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 11-20, Jan. 2005.

CAMOLESI, J. F. **Volúmetria e teor alfa-bisabolol para candeia *Eremanthus erythropappus***. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

CAMPOS, J. C. C.; TORQUATO, M. C.; RIBEIRO, G. A. Equações para calcular índices de local e incremento da altura em plantações puras de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 9, n. 1, p. 1-9, jan./jun. 1985.

CARVALHO, S. P. C. **Volúmetria para *Anadenanthera colubrina* Vell. Brenan**. 2007. 46 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

CARVALHO, S. P. C.; LIMA, M. P.; CALEGARIO, N.; ERAZO, N. D. C.; VELOSO, R. B. Efeito da decomposição de parâmetros na relação hipsométrica para *Toona ciliata* var. *australis* F.Muell. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 4., 2008, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2008. 1 CD-ROM.

CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 799-809, nov./dez. 2003.

CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 85 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENNAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: J. Wiley, 1983. 333 p.

CORDER, S. E. **Wood and bark as fuel**. Corvallis: School of Forestry, 1973. 28 p.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no estado de São Paulo. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 37, p. 33-44, dez. 1987.

COWN, D. J. Comparasion of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Wellington, v. 8, n. 3, p. 384-391, 1978.

COWN, D. J. **Evaluation of the pilodyn wood tester for the assessment of wood density in standing trees**. Tralagon: CSIRO, 1979. 4 p. Technical Note.

CURTIS, R. O.; HYINK, D. M. Data for growth and yield models. In: GROWTH AND YIELD AND OTHER MENSURATIONAL TRICKS: A REGIONAL TECHNICAL CONFERENCE, 1., 1984, Logan. **Proceedings...** Logan: USDA, 1984. p. 6-7.

DANIEL, T. W.; HELMS, J. A.; BAKER, F. S. **Principles of silviculture**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1979. 500 p.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1987. 790 p.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, Lawrence, v. 18, n. 3, p. 241-245, 1972.

DOAT, J.; PETROFF, G. La carbonisation des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-Sur-Marne, v. 159, p. 55-72, Feb. 1975.

FERRARI, G. Influenza dell umidità e della densità basale sul potere calorifico del legno. **Quaderni di Ricerca**, Roma, n. 21, p. 1-16, 1988.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p. 39-46, June 1996.

FISCHER, F.; SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M. de; MAESTRI, R. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 167-188, jan./fev. 2001.

FRANCO, E. J. **Estudos dos métodos estimativos de volume, biomassa e nível de produtividade para *Eucalyptus camaudulensis***. 1996. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GOMES, A. G.; VARRIALE, M. C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2004. 503 p.

GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G. Um novo modelo para descrever o perfil do tronco. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, p. 170-180, jul./dez. 1992.

GUIMARÃES, M. A. M.; CALEGARIO, N.; CARVALHO, L. M. T.; TRUGILHO, P. F. Height-diameter models in forestry with inclusion of covariates. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 3, p. 313-321, jul./set. 2009.

HASENAUER, H. Princípios para a modelagem de ecossistemas florestais. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 20, p. 53-69, 2000.

HEIN, P. R. G.; CAMPOS, A. C. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, abr./jun. 2009.

HOWARD, A. M. Heat of combustion of various southern pine materials. **Wood Science**, London, v. 5, n. 3, p. 194-197, 1973.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. New York: The Ronald, 1972. 410 p.

LADEIRA, H. **Quatro décadas de Engenharia Florestal no Brasil**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2002. 207 p.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 321-328, maio/jun. 2002.

MENDONÇA, A. R. de; SILVA, G. F. da; OLIVEIRA, J. T. da S.; NOGUEIRA, G. S. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus sp.* para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 71-82, jan./mar. 2007.

PIRES, L. M. **Ajuste e diagnóstico de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal das árvores**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PLACIDO, A. C.; FIGUEIREDO FILHO, S. do A.; OLIVEIRA, A.; BATISTA, E. Dinâmica da relação hipsométrica em função da idade, do sítio e da densidade inicial de povoamentos de Bracatinga da região metropolitana de Curitiba, PR. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 517-533, jul./ago. 2004.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.

RIOS, M. S. **A eficiência das funções polinomiais, da função spline cúbica, e razões de volume para representar o perfil de árvores e estimar os sortimentos de *Pinus elliotti***. 1997. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RUFINI, A. L. **Volumetria, peso de matéria seca, teor de tanino e cortiça para o Cerrado *Sensu Stricto* em Minas Gerais**. 2008. 293 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Influência da intensidade do desbaste sobre o crescimento em altura de *Pinus elliottii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 20-28, jan./jun. 1993.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; KLEIN, J. E. M.; TOTTI, J. A.; BAZZO, J. L. Forma do tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 79-88, jan./jun. 1996.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad**. Berlin: Wurt-Forstl, 1966. No page.

- SCHUMACHER, F. X. A new growth curve and its application to timber studies. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 37, p. 819-820, 1939.
- SCOLFORO, J. R. S. **Mensuração florestal 4**: classificação de sítios florestais. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 138 p.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: parte I: modelos de regressão linear e não-linear; parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus elliotii* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 18, n. 1/2, p. 140-158, 1988a.
- SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio, para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 18, n. 1/2, p. 159-173, 1988b.
- SCOLFORO, J. R. S.; RIOS, M. S.; OLIVEIRA, A. D. de; MELLO, J. M. de; MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliotii*. **Cerne**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 100-122, jan./jun. 1998.
- SILVA, G. F.; CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Uso de métodos estatísticos para comparar alternativas de estimação do volume comercial. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 1997.
- SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, Oxford, v. 81, n. 1, p. 13-31, Oct. 2008.
- SOARES, T. S.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, S. O.; MELLO, J. M. de. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 845-854, nov./dez. 2004.
- STERNADT, G. H. **Cubagem de toras de mogno**: comparação do processo do IBAMA e o adotado por madeireiras. Brasília: IBAMA, 2001. 65 p.

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus* sp.** 2002. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

TRUGILHO, P. F. Basic density and dry mass and lignin mass estimate in Eucalyptus wood species. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, set./out. 2009.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, jan./jun. 2000.

VEIGA, R. A. de A. O uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2., 1984, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/IPEF, 1984. p. 93-102.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MODELAGEM
APLICADO NO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE *Eucalyptus* sp
CLONAL**

1 RESUMO

Conhecer o estoque de madeira e modelar os componentes que afetam esta variável é de grande interesse para um empreendimento florestal. Com o avanço da informática e dos usos de recursos computacionais aplicados em análises estatísticas, foi possível gerar planejamentos e tomada de decisões mais precisas. Este trabalho tem como objetivo propor o uso de modelos não lineares clássicos e generalizados na estimativa de variáveis dendrométricas, em nível individual e de povoamento para relação hipsométrica, classificação de sítios florestais, crescimento em área basal, modelo de volume por árvore individual e projeção do crescimento e da produção em volume total. A finalidade é a de simplificar o processamento do inventário florestal, gerando modelos mais parcimoniosos, de interpretação física biológica e com alta precisão. Foi utilizado o método dos modelos não lineares generalizados no ajuste dos modelos propostos e os critérios de informação bayesiano, de Akaike e o teste da máxima verossimilhança como medidas de seleção e qualidade de ajuste, além do erro padrão residual e percentual e dos gráficos de resíduos. Para ajuste e processamento dos dados foi utilizado o software estatístico R versão 2.9.2. Os modelos se mostraram com uma boa performance, altamente precisos e parcimoniosos nas estimativas das variáveis propostas.

Palavras-chave: Planejamento Florestal, Variáveis dendrométricas, Recursos Computacionais, Estatística Aplicada

2 ABSTRACT

With the advancements in computing resources and analytical software, it has been possible to plan and to make more accurate decisions in this work and knowledge field. Thus, this work proposes the use of classic and generalised non linear models to estimate the dendrometric variables at individual level, the population height–diameter relation in forest stands, and classification of forest sites, basal area growth, yield in total volume and tree growth projection. The objective is to simplify the forest inventory processing system by generating more parsimonious models that allow physical and biological interpretation with high precision. With this aim, it was applied the method based on generalised non linear models to fitting the proposed models, the Akaike and Bayesian information criteria, the Likelihood Ratio Test for evaluating the quality of the fitted models, the standard deviation of the error term and graphic residual analysis. For data fitting and processing, it was used the statistical software R, version 2.9.2. The models fit have shown a good performance, being highly precise and parsimonious in estimating the proposed variables.

Key-words: Forest Planning, Dendrometric variable, Computing Resources, Applied Statistics

3 INTRODUÇÃO

Conhecer o estoque de madeira de um empreendimento florestal é um fator de grande relevância, pois gera planejamentos mais precisos e com tomadas de decisões mais sensatas. O uso de modelos estocásticos, ou probabilísticos, aplicados a dados oriundos de inventário florestal facilita e gera um suporte técnico na tomada de decisões de um gerente florestal.

O que se deseja na linha de modelagem são modelos capazes de descrever uma realidade com maior nível de precisão. O avanço dos recursos computacionais e o desenvolvimento de microcomputadores com maior poder de processamento fez com que técnicas estatísticas mais atuais pudessem ser empregadas em várias áreas da pesquisa científica. Dentre estas técnicas, é possível citar o uso de modelos de regressão não lineares, generalizados e generalizados de efeito misto. Trabalhos no setor florestal que envolvem tais aplicações estão sendo empregados recentemente e foram estudados por Gregoire et al. (1995), Fang & Bailey (2001), Calegario et al. (2005a) e Budhathoki et al. (2008).

Em se tratando de dados de crescimento e produção florestal, estes são caracterizados por se apresentarem desbalanceados, longitudinais e irregularmente espaçados, ou seja, há um alto grau de complexidade no tratamento de dados desta natureza. Para se conhecer um estoque presente e futuro de um empreendimento florestal, são necessários vários passos até se chegar a um modelo de projeção da produção, tanto em volume, biomassa, peso de matéria seca, entre outras. Dentre estes passos, citam-se:

- ✓ Modelagem da relação altura-diâmetro, também conhecida como relação hipsométrica ($H\sim DAP$);
- ✓ Modelagem da altura das árvores médias dominantes e codominantes variando no tempo ($Hdc\sim Idade$);
- ✓ Classificação de sítios florestais (índice de produtividade local);

- ✓ Predição da densidade do povoamento, expressa por exemplo pela predição da Área Basal ($G \sim Idade$);
- ✓ Modelos para estimativa do volume por árvore individual ($V \sim DAP + H$);
- ✓ E por fim, predição e projeção da produção, expressa em volume por unidade de área.

Este trabalho tem como objetivo propor uma simplificação no processamento do inventário florestal por meio de modelos não lineares, clássicos e generalizados com adição de covariantes, aplicados na modelagem da relação hipsométrica, altura dominante, predição da área basal, volume árvore individual e projeção volumétrica para *Eucalyptus* clonal do tipo híbrido *Urocamaldulensis*. A finalidade é a obtenção de modelos parcimoniosos, de fácil interpretação e de alta precisão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo e dos dados

Para desenvolvimento deste estudo foram coletados dados da fazenda Itapoã, pertencente a empresa V&M Florestal, localizada no município de Paraopeba, região central do estado de Minas Gerais, Brasil. A região tem uma temperatura média anual de 20,9°C e precipitação anual de 1328,7 mm (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2009).

Os plantios são caracterizados por espaçamento 3x3 m e o solo é do tipo arenoso.

Foram cubadas 46 árvores distribuídas em diferentes idades, classe diamétrica e sítios, conforme tabela 1.

TABELA 1 Caracterização das árvores utilizadas nos procedimentos de ajuste dos modelos de crescimento e produção volumétrica.

Idade(anos)	Talhão	Classe de Sítio	Árvores Amostradas por Classe Diamétrica			
			5- 10	10- 15	15- 20	20- 25
8,83	268	III	2	2	2	2
7,85	158	II	2	2	2	2
6,82	163	III	2	2	2	---
6,05	220	III	2	2	2	---
5,46	227	II	2	2	2	---
3,83	110	II	2	2	---	---
3,21	210	II	2	2	---	---
1,79	186	I	2	2	---	---

I = 32,5 m; *II* = 27,5 m; *III* = 22,5 m; *IV* = 17,5 m.

4.2 Modelo de relação hipsométrica

4.2.1 Sigmoidal logístico de três parâmetros completo

Trata-se de um modelo biológico de crescimento em que há facilidade na interpretação de seus parâmetros, com um ponto de inflexão que expressa a taxa de máximo crescimento do organismo, assíntota que expressa o crescimento médio máximo, e um ponto de escala.

O ponto de assíntota é dado pela mesma unidade do eixo das ordenadas, sendo facilmente visualizado como valor médio máximo da variável resposta. O ponto de inflexão é dado na unidade do eixo x no ponto em que a curva muda de formato. O parâmetro de escala é obtido pela diferença entre o valor aproximadamente 70% da resposta média máxima e o valor na inflexão e possui a mesma unidade do eixo das abscissas. O modelo completo é expresso pelo modelo (1).

$$HT_i = \frac{\phi_{10} + \phi_{11}I_i + \sum_{i=1}^n \phi_{1i}IS_i}{1 + \exp\left(\frac{\left(\phi_{20} + \phi_{21}I_i + \sum_{i=1}^n \phi_{2i}IS_i\right) - DAP_i}{\left(\phi_{30} + \phi_{31}I_i + \sum_{i=1}^n \phi_{3i}IS_i\right)}\right)} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que:

HT = altura total da i -ésima árvore (m); I = idade da i -ésima unidade amostral (anos); IS = índice de sítio na idade de sete anos variando de 17,5 à 32,5 m da i -ésima unidade amostral; DAP_i = diâmetro a altura do peito, medido a 1,30 m do solo (cm) da i -ésima árvore que compõe a unidade amostral; ϕ_i = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

$\sum_{i=1}^n \phi_{ji} IS$ = parâmetro com uma variável indicadora dummy associada ao *i-th* índice de sítio, com valor 1 para o *i-th* índice de sítio e 0 para os demais, para o *j-th* parâmetro.

Para ajuste do modelo (1), foi utilizada a teoria dos modelos não lineares generalizados, em que foi inserido o efeito das covariantes idade e índice de sítio nos três parâmetros do modelo. Tal técnica é de grande valia, pois baseia-se na hipótese de que as variações da altura não dependem apenas das variações do diâmetro.

4.3 Classificação de sítio

É previsto um comportamento de não linearidade nos dados de altura média das árvores dominantes e codominantes versus a idade, sendo indicado o uso de um modelo não linear para esta situação, conforme observado na figura 1. O uso de modelos não lineares segundo Ratkowsky (1983) é plausível, pois apresentam interpretação física/biológica dos parâmetros e parcimônia.

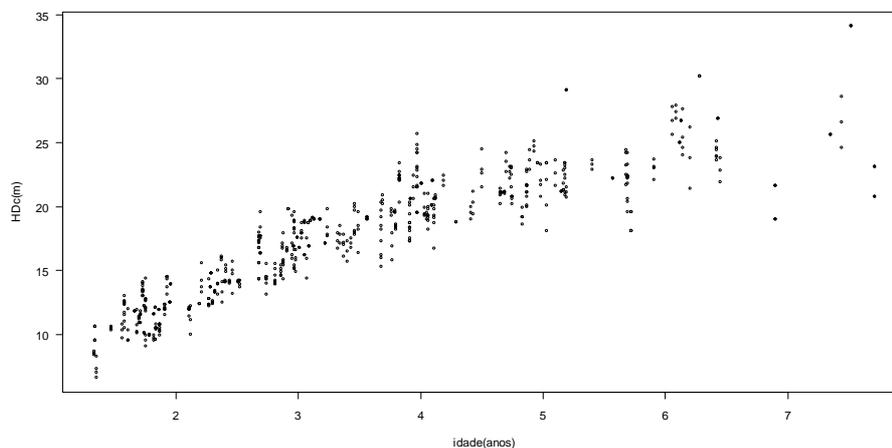


FIGURA 1 Comportamento da altura média das árvores dominante e codominante em função do tempo.

Pela análise da figura 1, é possível verificar a existência de heterocedasticidade nos dados do tipo funil crescente, sendo necessária uma transformação nos dados originais ou ainda a sua modelagem conforme será visto em funções para heterocedasticidade.

E ainda como há remedição no tempo, os dados apresentam como característica, resíduos autocorrelacionados.

4.3.1 Modelo proposto

Foi proposto o uso de um modelo biológico de dois parâmetros, também denominado de monomolecular, que retratam as leis biológicas de crescimento, em que \square_1 representa um ponto assintótico e \square_2 a taxa de maturidade do organismo. Em florestas de rápido crescimento como as do gênero *Eucalyptus* o ponto de inflexão comumente não é captado pela amostragem, ou seja, ocorre anteriormente aos dois anos de idade da planta, sendo que as parcelas

permanentes são lançadas em campo neste momento de vida do povoamento. O modelo na sua forma original é dado por:

$$\overline{HDc}_i = \phi_1 * [1 - \exp(\phi_2 * I_i)] + \varepsilon_i \quad (2)$$

Sendo:

HDc = altura média das árvores dominantes e codominantes da i -ésima unidade amostral, segundo conceito de Assman (m); I = idade da i -ésima unidade amostral (anos); ϕ_i = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

Os valores de índice de sítio foram gerados por meio do rearranjo do modelo (2), considerando que o mesmo irá gerar curvas anamórficas, em que foi isolado o parâmetro ϕ_1 do modelo original (2), expresso pelo modelo (2.1).

$$IS_i = \frac{LC}{1 - \exp(\phi_2 * I_i)} [1 - \exp(\phi_2 * Iref_i)] \quad (2.1)$$

Sendo:

IS = índice de sítio na idade de 7 anos da i -ésima unidade amostral (m); LC = limite da classe variando de 15 a 35 m com amplitude de 5 m; $Iref$ = idade de referência da i -ésima unidade amostral (7 anos).

Com o objetivo de retratar a realidade dos dados, foram utilizadas as funções poder de variância (“varPower”) para modelar a heterocedasticidade e modelo auto regressivo de ordem 1 para correlação dos resíduos. A escolha da ordem de um modelo AR é justificada pelo gráfico de correlograma.

4.4 Modelagem da variância e da autocorrelação dos resíduos

Para ajuste da heterocedasticidade, foi utilizada a função de variância de “*poder das covariantes*” expressa por *varPower* e especificada pelo argumento *weights* no software estatístico R por meio da função *gnls* da library *nlme*. Segundo Pinheiro & Bates (2009), uma representação deste modelo de variância é expresso por:

$$Var(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2 |\nu_{ij}|^{2\delta}$$

com a seguinte função de variância correspondente:

$$g(\nu_{ij}, \delta) = |\nu_{ij}|^\delta$$

Em que, ν_{ij} é um poder do valor absoluto variância da covariante. O parâmetro δ é irrestrito, ou seja, pode assumir qualquer valor real e assim pode modelar casos onde a variância aumenta ou diminui com o valor absoluto da variância da covariante. Trabalhos que envolvem este tipo de modelagem podem ser encontrados em Carvalho et al. (2009) e Zeviani et al. (2009).

Dados oriundos de parcelas permanentes são caracterizados por serem longitudinais, ou seja, apresentam como característica a remedição no tempo, ocasionando a quebra de independência dos resíduos, sendo esta uma das pressuposições básicas no ajuste dos modelos lineares e não lineares clássicos.

Para modelagem da estrutura de correlação dos resíduos, foi utilizada o modelo autoregressivo de ordem 1 [AR(1)]. Segundo Pinheiro & Bates (2009), o modelo *AR(1)* é o mais simples da classe dos autoregressivos, em que o valor absoluto da função de correlação diminui exponencialmente com o lag. Um modelo genérico autoregressivo que expresse a estrutura de correlação dos resíduos é dado por:

$$\varepsilon_t = \sum_{i=1}^p \phi_i \varepsilon_{t-i} + a_t \quad (3)$$

Em que:

ε_t = uma observação no tempo t ; ϕ_i = parâmetro de correlação de ordem p ; $t-i$ = distância entre duas observações (lag); a_t = ruído branco no instante t .

Ao modelar a autocorrelação dos resíduos, a_t será identicamente distribuído, com distribuição normal, média zero e variância constante σ^2 . Pela análise do modelo (3), verifica-se que dados que distam no tempo tendem a ser menos correlacionados.

4.5 Projeção da área basal

Para modelagem da área basal nível povoamento, foi utilizado o modelo assintótico com dois parâmetros (Pinheiro & Bates, 2009). Tal modelo foi inicialmente proposto para se estimar curvas de demanda de oxigênio bioquímico (Bates & Watts, 1988). O modelo para área basal na sua forma original é expresso por:

$$G_i = \phi_1 [1 - \exp(-\exp(\phi_2)I_i)] + \varepsilon_i \quad (4)$$

Em que:

G_i = área basal do povoamento ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$); I = idade da i -ésima unidade amostral (anos); ϕ_1 e ϕ_2 = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

O modelo (4) foi reajustado pela teoria dos modelos não lineares generalizados, com o objetivo de se adicionar ao modelo variáveis que além da idade também afetam as variações em G . Foram inseridas no modelo as covariantes índice de sítio e número de plantas por hectare, que representam

respectivamente uma variável indicadora de produtividade e densidade do povoamento. O modelo completo final é dado por:

$$G_i = \left(\phi_{10} + \phi_{11} + \sum_{i=1}^4 IS_i + \phi_{12} N_i \right) [1 - \exp(-\exp(\phi_2) I_i)] + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Sendo:

$\sum_{i=1}^n \phi_{ji} IS$ = parâmetro com uma variável indicadora dummy associada ao *i-th* índice de sítio, com valor 1 para o *i-th* índice de sítio e 0 para os demais, para o *j-th* parâmetro.

N_i = número de plantas por hectare extrapolado da *i*-ésima unidade amostral.

4.6 Estimativa do volume por árvore individual

Um modelo não linear de fácil ajuste comumente utilizado na estimativa do volume individual de árvores foi proposto por Schumacher & Hall (1933), sendo expresso pela equação:

$$V_i = \beta_0 * DAP_i^{\beta_1} * HT_i^{\beta_2} * \varepsilon_i \quad (5)$$

Em que:

V_i = volume da *i*-ésima árvore (m³); DAP_i = diâmetro a altura do peito da *i*-ésima árvore mensurado a 1,30 m do solo (cm); HT_i = altura da *i*-ésima árvore (m); β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

Sabe-se, inicialmente, que $V = \frac{\pi}{4} D^2 H$ portanto, o modelo apresenta interpretação dos seus parâmetros sendo que β_0 corresponde à correção da forma

da árvore, β_1 representa o valor associado ao DAP sendo este bem próximo a 2 e β_2 um valor correspondente à altura e bem próximo ao valor 1.

4.7 Modelagem do crescimento e produção volumétrica

Para modelagem do crescimento e projeção volumétrica foi utilizado o modelo sigmoidal logístico. O modelo foi proposto após análise gráfica da figura 2.

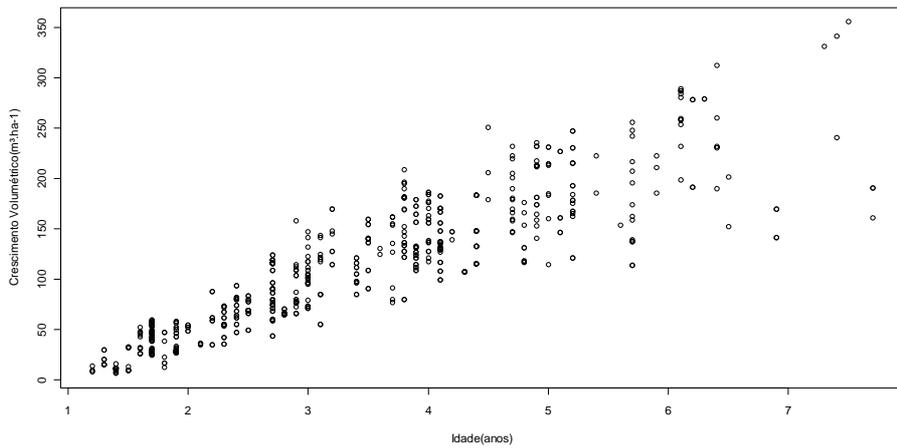


FIGURA 2 Comportamento do Crescimento volumétrico.

O modelo na sua forma original é dado por:

$$V_i = \frac{\phi_1}{1 + \exp\left(\frac{\phi_2 - I_i}{\phi_3}\right)} + \varepsilon_i \quad (6)$$

onde:

V_i = volume da i ésima unidade amostral ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$); I_i = idade da i ésima unidade amostral (anos); ϕ_i = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

Trata-se de um modelo não linear de comportamento biológico em que o parâmetro ϕ_1 representa o ponto de assíntota, dado pelo valor médio máximo da variável resposta. O parâmetro ϕ_2 corresponde ao ponto de inflexão, em que este representa o ponto de máxima taxa de crescimento, dado pelo ponto em que há mudança na curvatura e sua unidade é a mesma do eixo x. O parâmetro ϕ_3 representa o ponto de escala em que este é obtido pela diferença entre o valor aproximadamente 70% assíntota e o valor na inflexão e possui a mesma unidade do eixo das abscissas.

O modelo (6) foi reajustado inserindo-se o efeito da heterocedasticidade no processo de modelagem, conforme observado pela figura 2 e seus parâmetros foram decompostos com adição das covariantes índice de sítio e área basal para melhoria da precisão do modelo. Para ajuste do modelo, foi utilizada a função *gnls* implementada no software estatístico R na biblioteca *nlme*. O modelo completo é dado por:

$$V_i = \frac{\phi_{10} + \phi_{11}IS_i + \phi_{12}G_i}{1 + \exp\left[\frac{(\phi_{20} + \phi_{21}IS_i + \phi_{22}G_i) - I_i}{\phi_{30} + \phi_{31}IS_i + \phi_{32}G_i}\right]} + \varepsilon_i \quad (6.1)$$

Sendo:

IS = índice de sítio ao 7 anos da i -ésima unidade amostral (m); G = área basal projetada pelo modelo (4.1) da i -ésima unidade amostral ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$).

4.8 Avaliação da qualidade de ajuste dos modelos

Os modelos tiveram sua qualidade de ajuste avaliada pelas seguintes estatísticas:

4.8.1 Erro padrão residual e percentual

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n - p}} \quad S_{yx} (\%) = \frac{S_{yx}}{Y} \cdot 100$$

Em que: S_{yx} = erro padrão da estimativa na unidade da variável resposta; $S_{yx} (\%)$ = erro padrão relativo (%); \hat{Y} = variável regressora estimada pelo modelo; Y = variável observada; n = número de observações; p = número de parâmetros.

4.8.2 Critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação Bayesiano (BIC)

$$AIC = -2\ln(mv) + 2p$$

$$BIC = -2\ln(mv) + p\ln(n)$$

‘Quanto menores os valores de *AIC* e *BIC* melhor o modelo ajustado. As estatísticas *AIC* e *BIC* são de grande importância na análise de regressão, pois penalizam modelos com número excessivos de parâmetros, selecionando modelos mais parcimoniosos.

4.8.3 Teste da razão da máxima verossimilhança (TRMV)

É um teste de comparação dois a dois de modelos hierárquicos (aninhados) dado pela diferença entre os valores máximos da função de verossimilhança dos modelos, expresso por:

$$\text{TRMV} = 2[\ln(mv_2) - \ln(mv_1)]$$

Este valor é testado pela estatística χ^2 com $p_2 - p_1$ graus de liberdade. Se o valor de TRMV for significativo ao nível de α de probabilidade, o modelo com maior valor de mv (máxima verossimilhança) apresenta maior precisão.

Foi feita ainda a análise gráfica de resíduos para verificar as pressuposições básicas de análise de regressão em que os resíduos se assumem independentes, identicamente distribuídos, com distribuição normal, média zero e variância constante σ^2 .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Modelo hipsométrico

Os parâmetros do modelo completo para relação hipsométrica seguidos das respectivas covariantes associadas a cada parâmetro e níveis de significância são mostrados na tabela 2.

TABELA 2 Parâmetros estimados para o modelo hipsométrico logístico completo e suas respectivas estatísticas.

Parâmetro	Covariante Associada	Valor	Erro padrão	t-valor	p-valor
Assíntota	Intercepto	17,470285	1,0019789	17,43578	< 0,0001
	Idade	0,472536	0,0885538	5,336147	< 0,0001
	sítio 22,5	3,584146	0,794559	4,510861	< 0,0001
	sítio 27,5	7,997772	0,8186711	9,769213	< 0,0001
	sítio 32,5	16,467905	2,2292985	7,387034	< 0,0001
Inflexão	Intercepto	16,30614	0,6254335	26,071739	< 0,0001
	Idade	-1,65123	0,0623875	-26,467303	< 0,0001
	sítio 22,5	-3,300327	0,488987	-6,749315	< 0,0001
	sítio 27,5	-1,382215	0,4926431	-2,805713	0,005
	sítio 32,5	2,323096	1,2609084	1,842399	0,0655
Escala	Intercepto	4,081418	0,7909979	5,159834	< 0,0001
	Idade	0,037248	0,0476394	0,781883	0,4343
	sítio 22,5	1,716251	0,7574985	2,265683	0,0235
	sítio 27,5	2,955842	0,7636503	3,870675	0,0001
	sítio 32,5	5,314887	0,9280733	5,726797	< 0,0001

De acordo com o teste “t”, todos os parâmetros são significativos a um nível de 10% de significância, a exceção da covariante idade, associada ao parâmetro de escala, ou seja, seu valor é igual a zero, porém de uma maneira geral, as variáveis idade e sítio influenciam na relação diâmetro-altura.

Como complemento de uma análise de regressão, são mostrados os gráficos de resíduos e de valores estimados versus observados, conforme figuras 3 e 4.

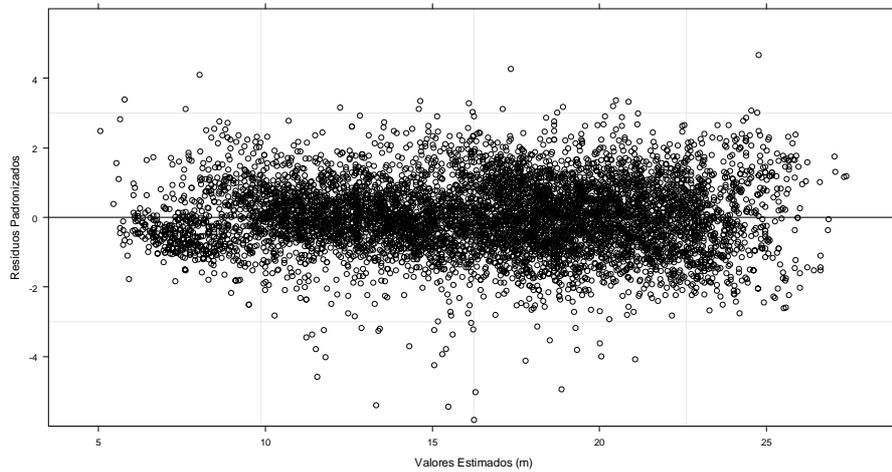


FIGURA 3 Gráfico de resíduos para o modelo hipsométrico logístico completo.

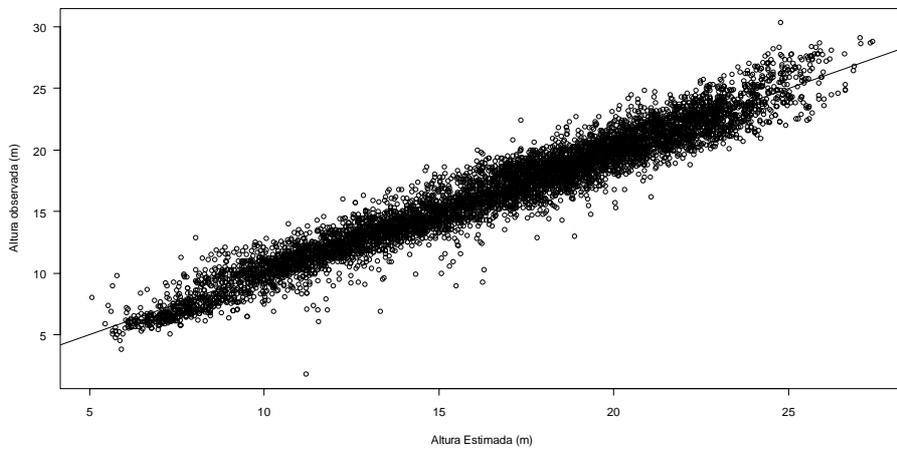


FIGURA 4 Plot dos valores estimados versus os valores observados para relação hipsométrica.

Verifica-se a boa distribuição dos resíduos do modelo hipsométrico logístico completo por meio da análise visual da figura 3, uma vez que os mesmos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero. Observa-se também

que o modelo hipsométrico ajustado abrange toda a base de dados na sua estimativa, sendo que as alturas observadas variam de 6,9 a 21,4 m, o que também é um indicador de qualidade ajuste e seleção de modelos de regressão.

A boa qualidade de ajuste do modelo é também verificada pela figura 4, em que os valores estimados estão bem próximos dos valores observados, abrangendo toda a base de dados de ajuste. Resultados semelhantes com a utilização do modelo completo logístico podem ser encontrados em Guimarães et al. (2009).

TABELA 3 Diagnóstico de ajuste do modelo hipsométrico sigmoidal completo.

Modelo	Syx (m)	Syx (%)
Hipsométrico Sigmoidal Completo	1,1880	7,1598

As estatísticas da tabela 3 comprovam a boa performance do modelo hipsométrico completo em que se verifica um erro médio de 7,15% ou 1,18 m.

Para ilustrar a flexibilidade do modelo hipsométrico proposto, foi gerada a figura 5 conforme a seguir.

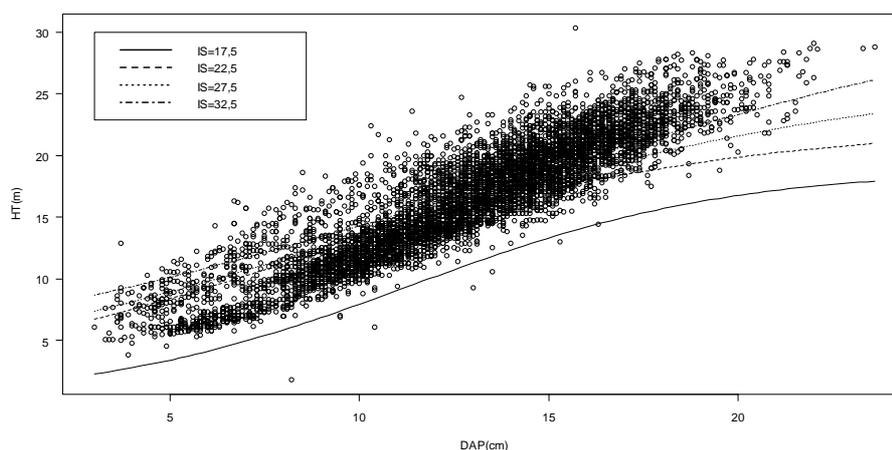


FIGURA 5 Plot ilustrativo da flexibilidade do modelo hipsométrico completo.

Para gerar a figura 5 foi fixada a idade de 3 anos variando os índices de sítio, que são respectivamente 17,5; 22,5; 27,5; 32,5 m. É possível verificar a grande flexibilidade apresentada pelo modelo completo, contemplando toda a base de dados e reduzindo o erro na estimativa em função da combinação idade e sítio.

5.2 Classificação de sítio

As estatísticas dos modelos homocedástico, heterocedástico e heterocedástico autocorrelacionado para seleção do modelo de classificação de sítio são mostradas pela tabela 4 e 5.

TABELA 4 Erro padrão residual e erro padrão residual percentual para os modelos de classificação de sítio avaliados.

Modelo	Syx (m)	Syx (%)
Homocedástico	1,8376	10,3292
Heterocedástico	1,8382	10,3326
Heterocedástico Autocorrelacionado	1,9293	10,8485

TABELA 5 Comparação do modelo homocedástico, heterocedástico e heterocedástico autoregressivo para ajuste do modelo de classificação de sítio.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	LogLik	TRMV	p-valor
Homocedástico	3	2302,85	2315,87	-1148,42	---	
Heterocedástico	4	2244,12	2261,48	-1118,06	60,73	< 0,0001
Heterocedástico Autocorrelacionado	5	1793,19	1814,9	-891,59	452,92	< 0,0001

Apesar de os resultados da tabela 4 indicarem um erro padrão médio um pouco mais elevado para o modelo heterocedástico autocorrelacionado, este é preferível aos demais modelos conforme a melhoria progressiva observada no

modelo dado pelos baixos valores de AIC e BIC e alta significância no TRMV, conforme tabela 5.

A preferência pelo modelo heterocedástico autocorrelacionado é comprovada pela análise visual gráfica dos resíduos dada pelas figuras 6 e 7, em que se verifica uma melhora significativa na distribuição dos resíduos, quando corrigida a tendência de um funil crescente para o modelo homocedástico, sendo que os erros tendem a uma distribuição aleatória idêntica em torno de zero.

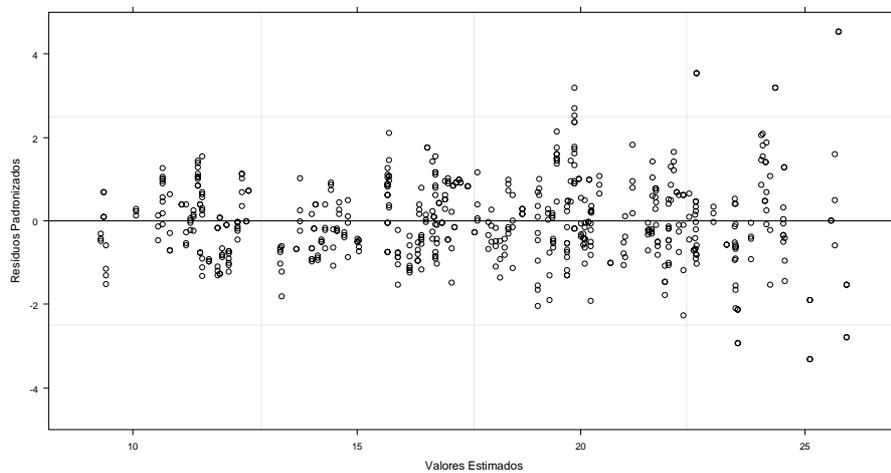


FIGURA 6 Gráfico de resíduos para o modelo homocedástico para altura dominante.

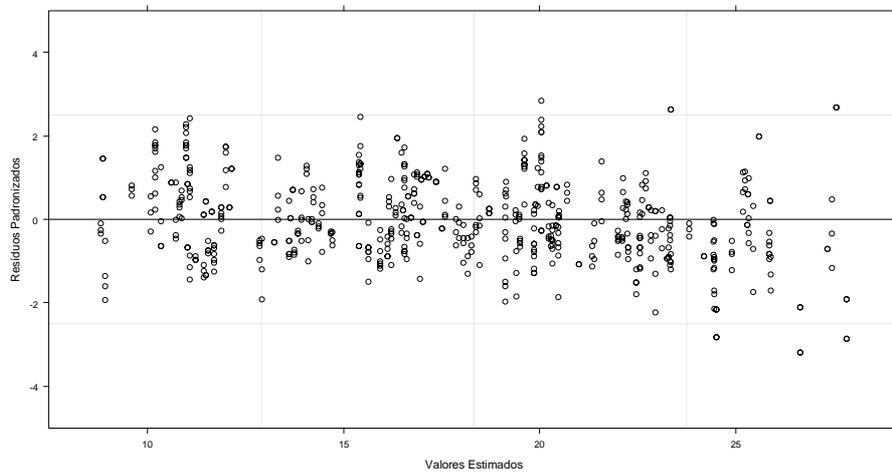


FIGURA 7 Gráfico de resíduos para o modelo heterocedástico para altura dominante.

O uso do modelo com autocorrelação é também justificado pela análise gráfica da função de autocorrelação dos resíduos dado pela figura 8.

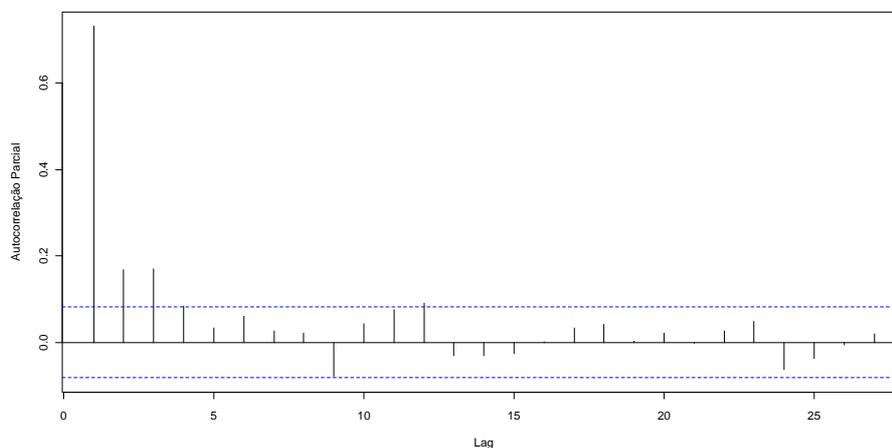


FIGURA 8 Gráfico de autocorrelação parcial dos resíduos do modelo heterocedástico não correlacionado para estimativa da altura dominante.

A análise gráfica sugere que os resíduos do modelo são autocorrelacionados, sendo necessário modelá-los. É possível verificar um ápice no primeiro lag da função de autocorrelação parcial, sugerindo um modelo autoregressivo de ordem 1, representado por AR(1).

Os parâmetros do modelo heterocedástico autoregressivo são gerados pela tabela 6 a seguir.

TABELA 6 Parâmetros do modelo heterocedástico com autocorrelação utilizado na estimativa da altura das árvores dominantes e codominantes.

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
α_1	33,57586	0,8605	39,0166	< 0,0001
α_2	-0,22912	0,0092	-24,8041	< 0,0001

Verifica-se o alto grau de significância dos parâmetros para o modelo heterocedástico autocorrelacionado selecionado. Através da técnica de rearranjo do modelo ajustado, foi possível gerar as curvas anamórficas de classificação dos sítios, gerando 4 classes de produtividade representadas por 17,5; 22,5; 27,5 e 32,5 m correspondida pelas classes IV, III, II e I respectivamente. A figura 9 ilustra este procedimento.

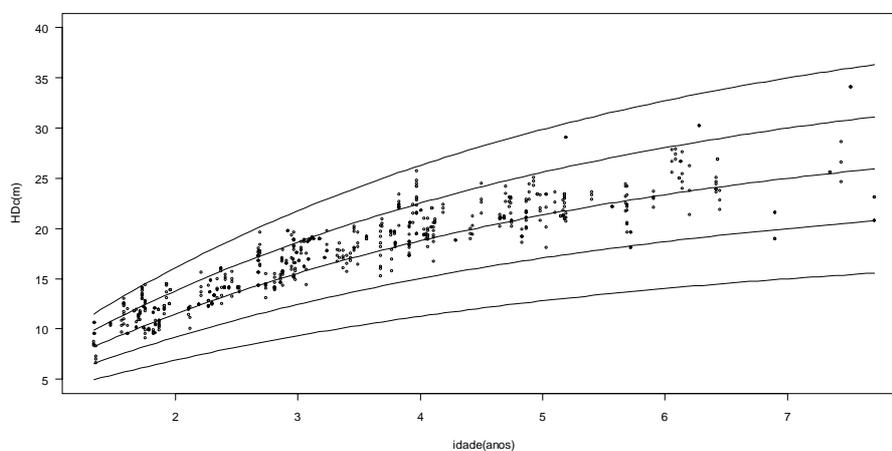


FIGURA 9 Curvas de Índice de Sítio geradas pelo modelo heterocedástico com autocorrelação.

De acordo com a figura 9, é possível concluir que o modelo apresenta boa performance, abrangendo toda a base de dados, apresentando um ponto de assíntota ao longo do tempo, retratando as leis biológicas de crescimento de uma variável biométrica, sendo que este ponto representa o valor de crescimento médio máximo que um organismo vivo pode atingir.

5.3 Projeção da área basal

As saídas para seleção e indicador da qualidade de ajuste dos modelos são apresentados na tabela 7 e 8 a seguir.

TABELA 7 Tabela de análise da variância para seleção do modelo utilizado na estimativa da área basal.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	LogLik	TRMV	p-valor
Simples	3	2517,17	2530,17	-1255,58	---	
Completo	7	2271,60	2301,94	-1128,80	253,56	< 0,0001

TABELA 8 Estatísticas de erro padrão e erro padrão residual para modelagem da área basal.

Modelo	Syx ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	Syx%
Simples	2,2457	15,5677
Completo	1,8001	12,4775

Foi possível verificar um melhora significativa no modelo completo com adição de covariantes para o modelo de projeção da área basal, ou seja, as variáveis índice de sítio e número de plantas por hectare afetam significativamente a relação $G \sim I$. Esta afirmativa é confirmada pelo alto grau de significância do TRMV indicando uma melhora progressiva no modelo e a redução de 3% no erro padrão residual.

Os parâmetros para projeção da área basal são dados pela tabela 9.

TABELA 9 Parâmetros do modelo assintótico completo para estimativa da área basal.

Parâmetro	Covariante Associada	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
β_1	Intercepto	6,4143	3,2454	1,9764	0,0486
	sítio 22,5	6,9458	1,4561	4,7699	< 0,0001
	sítio 27,5	12,6659	1,5511	8,1657	< 0,0001
	sítio 32,5	16,1038	1,8401	8,7516	< 0,0001
	N	0,0184	0,0026	6,8772	< 0,0001
β_2	---	-1,9682	0,0631	-31,1505	< 0,0001

Verifica-se que os parâmetros para o modelo completo de projeção são altamente significativos conforme resultados da tabela 9. Os valores dos parâmetros para cada covariante associada indica a representação de uma variável dummy somada aos valores do intercepto.

A boa qualidade de ajuste do modelo proposto é também verificada pela análise visual gráfica dos resíduos, dada pela figura 10.

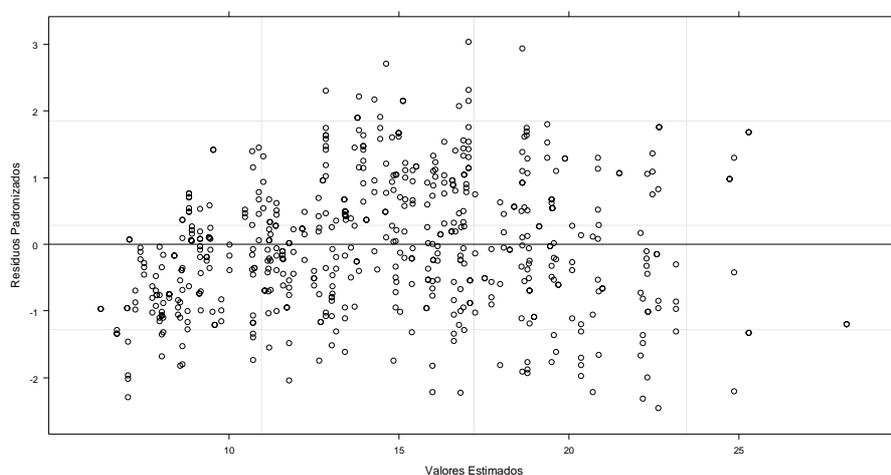


FIGURA 10 Gráfico de resíduos para o modelo completo utilizado na estimativa da área basal.

A figura 10 complementa os resultados obtidos pelas tabelas 7 e 8 de análise estatística, assumido que as pressuposições básica de análise de regressão de resíduos identicamente distribuídos, com média zero e variância constante σ^2 foram assumidas sem a necessidade de transformação nos dados.

5.4 Volume árvore individual

A tabela 10 apresenta os valores de erro padrão residual e erro padrão percentual para avaliação do modelo de Schumacher proposto na estimativa do volume por árvore individual.

TABELA 10 Estatística de erro padrão residual e erro padrão residual percentual para o modelo de Schumacher ajustado na estimativa do volume por árvore individual.

Modelo	Syx (m³)	Syx%
Schumacher	0,00603038	4,29

Como pode-se observar, o modelo ajustado apresenta baixos valores de erro padrão, gerando erros médios em torno de 4,29%. Os parâmetros para o modelo de Schumacher utilizado na estimativa do volume por árvore individual são apresentados na tabela 11.

TABELA 11 Parâmetros para o modelo de Schumacher proposto na estimativa do volume por árvore individual.

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
β_0	0,000029453	0,0000052	5,63718	< 0,0001
β_1	1,91777	0,0465303	41,21560	< 0,0001
β_2	1,12102	0,0850887	13,17480	< 0,0001

Com base na significância dada pelo teste “t” é possível observar o alto grau de significância dos parâmetros, ou seja, os parâmetros tem seus valores

diferente de zero e seu uso é imprescindível na estimativa do volume por árvore individual.

5.5 Crescimento e produção volumétrica

As tabelas 12 e 13 apresentam a análise da variância para comparação e seleção do modelo para projeção do crescimento e da produção em volume por hectare com os respectivos valores de erro padrão residual e percentual.

TABELA 12 Análise da variância para comparação e seleção do modelo utilizado na projeção do crescimento e da produção em volume por hectare.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	logLik	TRMV	p-valor
Logístico Completo Heterocedástico	11	3327,21	3375,56	-1652,6	---	
Logístico Simples	4	5762,21	5779,79	-2877,1	2448,99	<0,0001

TABELA 13 Estatísticas de erro padrão e erro padrão residual para os modelos logístico simples e logístico completo heterocedástico para projeção em volume por hectare.

Modelo	Syx (m ³ .ha ⁻¹)	Syx%
Logístico Completo Heterocedástico	4,7836	4,01
Logístico Simples	29,57	26,31

Os baixos valores de AIC e BIC e o alto valor do TRMV com elevado grau de significância ($P < 0,0001$) apontam o modelo logístico completo heterocedástico na projeção da produtividade em volume por hectare. Estas conclusões implicam que os efeitos área basal e índice de sítio tornam o modelo completo mais adequado para a descrição dos dados. O que se observa também é a redução de 26,31 para 4,01% no erro padrão residual, ou seja, a modelagem da

heterocedasticidade bem como a adição do efeito das covariantes contribuem significativamente para melhoria do modelo.

Os parâmetros do modelo logístico completo heterocedástico selecionado para projeção do crescimento e da produção em volume por hectare são dados pela tabela 14.

TABELA 14 Parâmetros do modelo logístico completo selecionado para projeção do crescimento e da produção em volume por hectare.

Parâmetro	Covariante Associada	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
Assíntota	Intercepto	-206,567	14,582333	-14,16559	< 0,0001
	Sítio	8,43024	0,715025	11,79014	< 0,0001
	G	13,00883	0,379827	34,2494	< 0,0001
Inflexão	Intercepto	1,17424	0,396818	2,95915	0,0032
	Sítio	0,19462	0,017552	11,08775	< 0,0001
	G	-0,25528	0,018415	-13,86247	< 0,0001
Escala	Intercepto	4,33059	0,404723	10,70011	< 0,0001
	Sítio	-0,04908	0,013211	-3,71525	0,0002
	G	0,05381	0,014676	3,66628	0,0003

Sítio = índice de sítio aos 7 anos variando de 17,5 a 32,5 m; *G* = área basal projetada (m².ha⁻¹)

Os resultados da tabela 14 indicam que todos os parâmetros são significativos a um nível de 5% de significância, reforçando a idéia de que o efeito das covariantes índice de sítio e área basal contribuem significativamente para melhoria do modelo e seu uso é necessário.

A figura 11 de análise dos resíduos padronizados mostra o efeito da heterocedasticidade do tipo funil crescente para os dados de crescimento e produção em volume. Situação semelhante foi estudada por Calegario et al. (2005b).

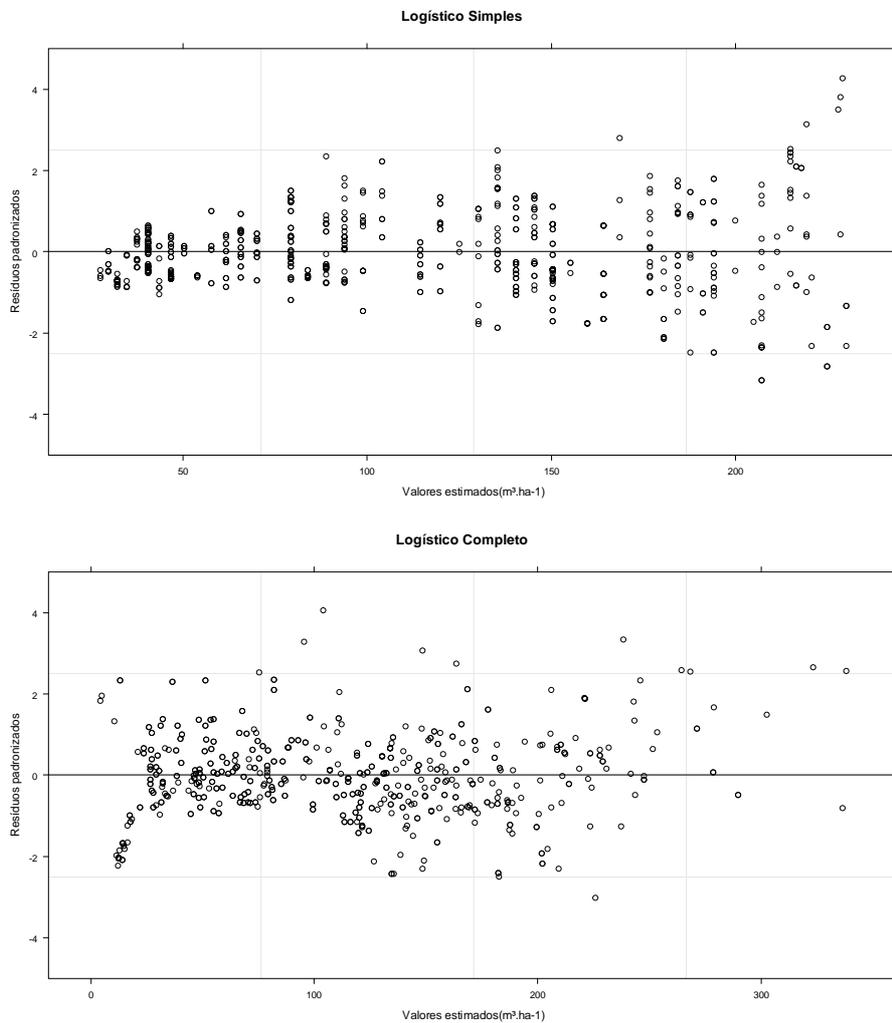


FIGURA 11 Gráficos de resíduos para os modelos sigmoidais logístico ajustados para projeção do crescimento e da produção volumétrica.

Verifica-se uma melhora significativa na distribuição dos resíduos para o modelo heterocedástico quando comparado ao modelo homocedástico, sendo que quando corrigido o efeito da heterocedasticidade os erros tenderam a uma

distribuição aleatória em torno de zero. Estes recursos computacionais são de grande relevância para os processos de modelagem e evolução técnico-científica, pois permitem trabalhar com os dados no seu formato original sem a necessidade de transformações para que se possam ser atendidas as pressuposições básicas de análise de regressão.

5.6 Aplicação do procedimento

Após desenvolvido e aplicado todo o desenvolvimento do sistema de modelagem proposto neste estudo foram selecionados quatro talhões aleatoriamente na base de dados para projeção do volume. As projeções de volume total por hectare foram feitas com idade variando de 2 a 10 anos. Foram utilizados os valores de incremento médio anual como ferramenta de suporte para a tomada de decisão e definição da rotação silvicultural. Os resultados são mostrados na tabela 15.

TABELA 15 Valores de incremento médio anual e incremento corrente anual em volume para as diferentes classes de sítio.

Idade	Classes de Sítio											
	I			II			III			IV		
	Volume	IMA	ICA	Volume	IMA	ICA	Volume	IMA	ICA	Volume	IMA	ICA
2	56,89	28,45		51,66	25,83		35,25	17,62		15,46	7,73	
2,5	81,18	32,47	24,28	72,72	29,09	21,06	51,00	20,40	15,76	27,34	10,94	11,88
3	108,42	36,14	27,24	95,89	31,96	23,16	68,28	22,76	17,28	40,40	13,47	13,07
3,5	137,41	39,26	28,99	120,24	34,36	24,36	86,49	24,71	18,21	54,24	15,50	13,84
4	167,06	41,77	29,65	145,01	36,25	24,76	105,10	26,28	18,62	68,49	17,12	14,24
4,5	196,48	43,66	29,42	169,54	37,68	24,54	123,70	27,49	18,60	82,82	18,41	14,34
5	225,03	45,01	28,55	193,40	38,68	23,86	141,96	28,39	18,26	97,01	19,40	14,19
5,5	252,29	45,87	27,26	216,28	39,32	22,88	159,64	29,03	17,68	110,87	20,16	13,86
6	278,01	46,34	25,72	237,99	39,67	21,71	176,59	29,43	16,95	124,26	20,71	13,40
6,5	302,09	46,48	24,08	258,45	39,76	20,46	192,71	29,65	16,12	137,11	21,09	12,84
7	324,50	46,36	22,41	277,62	39,66	19,17	207,95	29,71	15,24	149,35	21,34	12,24
7,5	345,28	46,04	20,78	295,51	39,40	17,89	222,30	29,64	14,35	160,95	21,46	11,60
8	364,50	45,56	19,22	312,16	39,02	16,66	235,75	29,47	13,45	171,91	21,49	10,96
8,5	382,25	44,97	17,75	327,64	38,55	15,48	248,34	29,22	12,59	182,22	21,44	10,31
9	398,62	44,29	16,38	342,00	38,00	14,36	260,09	28,90	11,75	191,91	21,32	9,69
9,5	413,72	43,55	15,10	355,31	37,40	13,31	271,04	28,53	10,95	200,98	21,16	9,08
10	427,65	42,76	13,92	367,65	36,77	12,34	281,24	28,12	10,20	209,48	20,95	8,49

Com base nas informações geradas, verifica-se pelos resultados da tabela 15 que os povoamentos devem ser cortados aos 6,5 para as classes de produtividade I e II e aos 7 e 8 anos para as classes III e IV respectivamente considerando-se apenas a rotação silvicultural.

Os resultados são compatíveis com aqueles encontrados em estudos desenvolvidos para projeção de florestas sem intervenções para fins de energia e celulose, os quais definem rotações técnico-econômicas bem próximas aos 7 anos.

A figura 12 ilustra as curvas de crescimento volumétrico para os diferentes sítios baseada no modelo de projeção logístico completo heterocedástico.

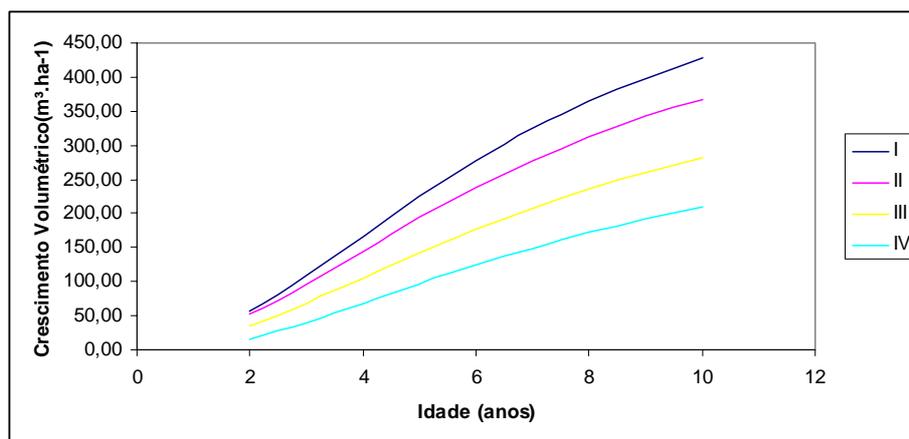


FIGURA 12 Crescimento e produção volumétrica para as diferentes classes de sítio.

De acordo com a figura 12, é verificada uma tendência esperada de maiores produtividades para as maiores classes de produtividade, indicando que o sistema proposto é compatível com a realidade.

6 CONCLUSÕES

Os modelos propostos mostraram uma boa performance, parcimoniosos, com alta precisão e aplicáveis dentro e fora da base de dados que os gerou, principalmente para os modelos de caráter biológico.

O uso de modelos não lineares é altamente aplicável para todas as situações que envolvem o processamento de um inventário florestal.

Modelos com funções de variância e de auto correlação dos resíduos melhoraram significativamente a precisão das estimativas e seu uso é justificável quando há presença de heterocedasticidade e de dados com medições repetidas no tempo (longitudinais) ou no espaço, como também por se tratar da aplicação de testes robustos para significância dos parâmetros e seleção dos modelos.

Ao tratar os dados na sua naturalidade em essência, ou seja, não havendo necessidade de transformação de variáveis e assumindo as pressuposições básicas de análise de regressão, foi possível gerar modelos mais precisos e interpretáveis quanto aos seus parâmetros por meio do uso de técnicas computacionais que há poucos anos atrás, não estavam disponíveis ou eram de acesso restrito.

A simplificação no uso de modelos com adição de covariantes gerou processamentos mais precisos e com um menor número de modelos a serem ajustados, porém requerem um maior esforço computacional.

O sistema de modelagem empírico de projeção volumétrica se mostrou altamente preciso e eficaz, gerando resultados satisfatórios e semelhantes aos trabalhos de definição de rotação silvicultural para florestas de uso único, como para celulose e carvão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATES, D. M.; WATTS, D. G. **Nonlinear regression analysis and its applications**. New York: Wiley, 1988. 365 p.

BUDHATHOKI, C. B.; LYNCH, T. B.; GULDIN, J. M. Nonlinear mixed modeling of basal area growth for shortleaf pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 8/9, p. 3440-3446, May 2008.

CALEGARIO, N.; DANIELS, R. E.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal Eucalyptus plantation case study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 11-20, Jan. 2005a.

CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; SOUZA, A. L.; MAESTRI, R. Estimativa do crescimento do povoamento de *Eucalyptus* baseada em modelos lineares em multiníveis de efeito misto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 251-261, mar./abr. 2005b.

CARVALHO, S. P. C.; SENA, A. L. M.; VELOSO, R. B.; CALEGARIO, N. Efeito da heterocedasticidade na estimativa do volume individual de árvores. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 54., 2009, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2009. 1 CD-ROM.

FANG, Z. X.; BAILEY, R. L. Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 3, p. 287-300, Aug. 2001.

GREGOIRE, T. G.; SCHABENBERGER, O.; BARRETT, J. P. Linear modeling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements. **Canadian Journal of Research**, Ottawa, v. 25, n. 1, p. 137-156, Jan. 1995.

GUIMARÃES, M. A. M.; CALEGARIO, N.; CARVALHO, L. M. T. de; TRUGILHO, P. F. Height-diameter models in forestry with inclusion of covariates. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 3, p. 313-321, jul./set. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 2009. 528 p.

RATKOWSKY, D. A. **Nonlinear regression modeling**. New York: M. Dekker, 1983. 276 p.

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

ZEVIANI, W. M.; CABRINI, E. C.; MUNIZ, J. A. Estudo do crescimento de frutos de goiaba por modelos não lineares com modelagem da variância. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 54., 2009, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2009. 1 CD-ROM.

CAPÍTULO 3

ARTIGO 2

**MODELAGEM DO PERFIL, DENSIDADE, MASSA E CRESCIMENTO
EM ENERGIA PARA *Eucalyptus* sp COM FINS ENERGÉTICOS**

1 RESUMO

Este trabalho tem como objetivo propor uma mudança no sentido filosófico do manejo de florestas clonais de *Eucalyptus* sp para fins energéticos, visando à compatibilização entre crescimento volumétrico e incremento energético por meio da modelagem da densidade, massa e crescimento calorimétrico. Fundamentado em técnicas de modelos não lineares generalizados e generalizados de efeito misto, os modelos propostos se mostraram altamente precisos, parcimoniosos e também com boa performance dentro e fora da base de dados que os gerou, principalmente para os modelos não lineares com parâmetro assintótico. Por meio de técnicas computacionais, foi possível conseguir melhorias nas estimativas em torno de 50%, além de que foi possível atender todas as pressuposições básicas de análise de regressão. Toda saída estatística foi feita por meio do software estatístico R versão 2.9.2, com uso dos pacotes *nlme*, *CAR*, *MASS* e *fBasics*. Para fins de seleção dos modelos foram utilizados critérios penalizadores como o de Akaike, Bayesiano e o Teste da Razão da Máxima Verossimilhança. E com a finalidade de se definir uma rotação silvicultural baseada em projeção calorimétrica, pode-se verificar que esta rotação se deu aos 6 anos para toda faixa de variação de sítio.

Palavras-chave: Manejo Florestal, Modelos Generalizados, Projeção Calorimétrica

2 ABSTRACT

This work seeks change the philosophical approach toward the management of *Eucalyptus* sp clonal forest for energy production, while reconciling volumetric efficiency and energy increase using density, mass and calorimetric growth modelling. Based on generalised non linear model techniques and on models of generalised missed effects, the models proposed have shown highly precise, parsimonious and have performed well whatever database generate them, especially for the non-linear models with asymptotic parameters. Through the use of computational resources, it was possible to obtain an estimate increase around 50% while meeting all basic assumptions of regression analysis. For the statistical procedure, it was used the statistical software R, version 2.9.2 along with the packages *nlme*, *CAR*, *MASS* and *fBasics*. For the model selection purpose, it were applied the Akaike and Bayesian information criteria and the Likelihood Ratio Test. In order to define a Silvicultural rotation based calorimetric projection. It was observed that this rotation occurred around a six year's period across the range of variation of the site.

Key-words: Forest Management, Generalized Models, Calorimetric Projection

3 INTRODUÇÃO

A silvicultura clonal de *Eucalyptus* sp para o suprimento de madeira em nível nacional e mundial tem grande relevância econômica e no Brasil, o gênero *Eucalyptus* é Representado por mais de 600 sp, sendo o mais relevante, seguido pelo *Pinus*. Ambos os gêneros apresentam rápido crescimento, grandes avanços tecnológicos em melhoramento genético (silvicultura clonal e transgenia), domínio de práticas silviculturais e, recentemente, usos nobres dos múltiplos produtos da madeira.

Quando se trata do uso do eucalipto para fins energéticos, principalmente para produção de carvão vegetal na fabricação do ferro gusa para diferentes produtos, uma visão mais ampla deve ser dada a tais florestas, pois o uso destas faz com que se reduzam as pressões sobre as florestas naturais, ao mesmo em que se trata de uma fonte natural renovável, cuja produção pode ter um caráter sustentável, não poluidora de outras fontes fósseis (Vale et al., 2006).

No manejo de florestas para fins energéticos, não se deve pensar apenas no aumento da produtividade em volume, mas sim numa compatibilização entre produtividade volumétrica, crescimento e produção calorimétrica e incremento em cerne.

Alguns autores têm desenvolvido trabalhos para florestas energéticas com modelos que envolvem principalmente a modelagem da densidade básica para estimativa da massa, porém apenas para valores presentes deixando de se pensar em projeção futura, citam-se como exemplo os os estudos de Soares et al. (1996), Thiersch (2002), Rufini (2008) e Trugilho (2009). Grande parte destes estudos usam a densidade média da árvore e modelos lineares múltiplos já existentes na literatura como Spurr, Meyer e Schumacher ou ainda análises da variância, para explicar as variações na densidade.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um sistema de modelagem para florestas cujo produto final é o carvão vegetal. Fundamentado

em técnicas de modelos generalizados e generalizados mistos, os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Ajustar um modelo polinomial para representação do perfil na estimativa do diâmetro a várias alturas;
- ✓ Ajustar um modelo não linear para estimativa da densidade básica ao longo do perfil das árvores;
- ✓ Compatibilizar, através de técnicas de integração, o modelo de perfil com o modelo de estimativa da densidade básica, para estimativa da massa por árvore individual;
- ✓ Ajustar um modelo para estimativa do poder calorífico superior por árvore individual;
- ✓ Ajustar um modelo de projeção do crescimento e produção em caloria por hectare, com base nos passos desenvolvidos anteriormente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

Para desenvolvimento deste estudo, foram coletados dados da fazenda Itapoã, pertencente à empresa V&M Florestal, localizada no município de Paraopeba, região central do estado de Minas Gerais, Brasil. A região tem como características climáticas, temperatura média anual de 20,9°C e precipitação anual de 1328,7 mm (IBGE, 2009).

Os plantios são caracterizados por espaçamento 3x3 m e o solo é do tipo arenoso.

Foram cubadas 46 árvores distribuídas em diferentes idades, classe diamétrica e de produtividade conforme tabela 1.

4.2 Coleta e geração dos dados para determinação da densidade e do poder calorífico

As tabelas 1 e 2 mostradas a seguir apresentam a distribuição por classe de diâmetro e idade das árvores utilizadas neste estudo, bem como as características dendrométricas e anatômicas das mesmas.

TABELA 1 Característica das árvores amostradas para desenvolvimento do estudo de crescimento e produção calorimétrica.

Idade(anos)	Talhão	Classe de Sítio	Árvores Amostradas por Classe Diamétrica			
			5- 10	10- 15	15- 20	20- 25
8,83	268	III	2	2	2	2
7,85	158	II	2	2	2	2
6,82	163	III	2	2	2	---
6,05	220	III	2	2	2	---
5,46	227	II	2	2	2	---
3,83	110	II	2	2	---	---
3,21	210	II	2	2	---	---
1,79	186	I	2	2	---	---

I = 32,5 m; *II* = 27,5 m; *III* = 22,5 m; *IV* = 17,5 m.

TABELA 2 Características dendrométricas e anatômicas das árvores amostras.

Arv	DAP(cm)	HT(m)	HC(m)	Id(anos)	PC(cal.g ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	VT(m ³)	VC(m ³)
1	6,9	12,67	8,87	7,85	4542,5	529,0983	0,0229	0,0222
2	17,1	24,97	22,78	7,85	4543,0	564,4462	0,2602	0,2597
3	20,0	25,88	23,18	7,85	4549,5	581,4221	0,3578	0,3571
4	18,7	26,05	23,56	7,85	4741,0	596,5366	0,3183	0,3177
5	9,9	17,70	14,20	7,85	4555,5	553,9740	0,0596	0,0587
6	11,0	19,86	16,66	7,85	4642,5	553,3906	0,0860	0,0853
7	20,0	26,59	24,35	7,85	4617,5	567,8688	0,3705	0,3700
8	9,0	15,50	12,74	7,85	4565,5	555,6760	0,0420	0,0413
9	9,2	17,94	14,15	6,83	4654,5	547,9854	0,0554	0,0545
10	14,7	23,30	20,89	6,83	4605,0	576,5974	0,1684	0,1678
11	18,2	24,72	22,37	6,83	4548,0	597,7467	0,2811	0,2806
12	18,1	24,82	23,00	6,83	4729,0	638,5713	0,2695	0,2691

... continua ...

TABELA 2, Cont.

Arv	DAP(cm)	HT(m)	HC(m)	Id(anos)	PC(cal.g ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	VT(m ³)	VC(m ³)
13	13,1	22,30	19,92	6,83	4759,0	583,5957	0,1300	0,1294
14	9,6	20,27	17,88	6,83	4608,5	534,5841	0,0708	0,0703
15	10,9	12,50	10,10	1,79	4562,0	457,3768	0,0540	0,0535
16	10,8	12,83	10,42	1,79	4614,0	454,3569	0,0518	0,0513
17	9,3	12,50	9,85	1,79	4584,5	449,6618	0,0365	0,0359
18	8,6	11,57	9,10	1,79	4574,0	441,2148	0,0310	0,0304
19	8,9	15,33	12,38	3,22	4811,0	536,1005	0,0416	0,0410
20	13,3	18,06	15,92	3,22	4563,5	537,0742	0,1077	0,1072
21	12,6	17,46	15,04	3,22	4572,5	525,3556	0,0925	0,0919
22	8,8	15,71	12,65	3,22	4603,0	504,4971	0,0440	0,0433
23	17,3	22,93	20,36	6,05	4621,5	581,9049	0,2251	0,2245
24	14,2	22,39	19,96	6,05	4719,0	569,0504	0,1419	0,1414
25	9,7	19,93	16,89	6,05	4506,5	521,1800	0,0635	0,0628
26	14,7	22,62	20,15	6,05	4578,5	562,6381	0,1551	0,1546
27	16,3	22,52	20,22	6,05	4693,5	567,1876	0,1939	0,1934
28	9,7	18,26	15,24	6,05	4548,5	526,8158	0,0616	0,0609
29	9,8	17,90	15,03	5,46	4450,5	524,2183	0,0615	0,0608
30	16,7	22,19	20,16	5,46	4673,0	559,2030	0,2108	0,2103
31	12,2	20,80	18,45	5,46	4517,0	554,8899	0,1144	0,1139
32	18,5	22,80	20,79	5,46	4557,0	565,0937	0,2569	0,2564
33	13,0	21,05	18,49	5,46	4519,5	555,2551	0,1297	0,1291
34	9,9	18,85	15,82	5,46	4583,5	531,8742	0,0625	0,0618
35	9,4	17,38	13,68	3,84	4667,5	515,2567	0,0514	0,0505
36	12,7	19,50	17,25	3,84	4602,0	552,0572	0,1114	0,1108
37	14,3	20,02	17,78	3,84	4617,5	548,7944	0,1425	0,1420
38	9,4	16,95	14,02	3,84	4579,5	530,2718	0,0518	0,0511
39	9,2	18,40	15,01	8,84	4626,5	597,4600	0,0541	0,0533

... continua ...

TABELA 2, Cont.

Arv	DAP(cm)	HT(m)	HC(m)	I(anos)	PC(cal.g ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	VT(m ³)	VC(m ³)
40	16,5	22,71	20,98	8,84	4670,5	626,6633	0,2217	0,2213
41	15,5	22,31	20,18	8,84	4597,0	631,6417	0,1842	0,1837
42	11,9	21,12	18,53	8,84	4574,0	619,3204	0,0983	0,0977
43	11,9	20,78	18,49	8,84	4489,0	608,1552	0,1074	0,1068
44	21,2	24,03	22,10	8,84	4647,5	652,5367	0,3748	0,3743
45	9,2	17,65	13,87	8,84	4591,0	595,5312	0,0572	0,0563
46	21,4	24,74	22,95	8,84	4607,5	630,1895	0,3716	0,3712

Arv = árvore; *DAP* = diâmetro medido a 1,30 m do solo; *HT* = altura total; *HC* = altura comercial; *I* = idade; *PCS* = poder calorífico superior; ρ = densidade média; *VT* = volume total; *VC* = volume comercial

As árvores foram selecionadas aleatoriamente em cada talhão, abatidas e retirados discos nas posições de 0%, 25%, 50% e 75% da altura total e no DAP, totalizando cinco discos por árvore, para determinação da densidade e do poder calorífico. Foi ainda obtido o diâmetro à altura do peito, altura total, altura comercial e volume pelo método de Smalian, com medições nas posições de 0,70 m, entre o DAP e 25%, entre 25 e 50% e na posição de 3 cm de diâmetro, correspondente à altura comercial.

Conforme a norma NBR 8633/84 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984), os discos foram quartejados e retiradas cunhas opostas. Destas cunhas, a fim de se gerar uma amostra composta por árvore, foram retiradas maravalhas que depois foram colocadas em estufa na temperatura de 40°C ± 2°C para aclimação. Posteriormente, este material foi moído e peneirado, coletando-se o material retido na peneira de 60 mesh. Este material gerado foi seco em estufa a 103°C ± 2°C e em seguida analisado pelo calorímetro digital IKA[®] C-200.

Foi ainda obtida a densidade dos discos nos pontos de coleta, pelo instrumento NIR (near infra red). As variações da densidade podem ser verificadas pela figura 2.

4.3 Modelagem do perfil

As variações do afilamento das árvores amostradas por sítio e idade podem ser verificadas pela figura 1.

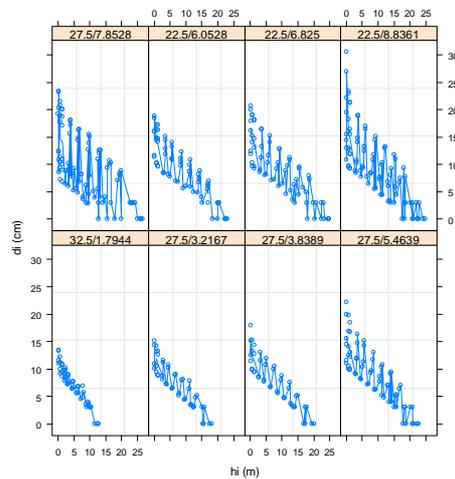


FIGURA 1 Variação do perfil das árvores amostradas nas diferentes classes diamétricas e idade.

Para estimativa do volume individual das árvores, foi utilizada uma função de afilamento, expressa por um modelo polinomial de 5º grau, proposto inicialmente por Schöpfer (1966), dado por:

$$\begin{aligned}
d_{ij} = & \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_{ij}}{Ht_i} \right) DAP_i + \beta_2 \left(\frac{h_{ij}}{Ht_i} \right)^2 DAP_i + \beta_3 \left(\frac{h_{ij}}{Ht_i} \right)^3 DAP_i + \\
& + \beta_4 \left(\frac{h_{ij}}{Ht_i} \right)^4 DAP_i + \beta_5 \left(\frac{h_{ij}}{Ht_i} \right)^5 DAP_i + \beta_6 I_i + \varepsilon_{ij}
\end{aligned} \tag{1}$$

Em que:

d_{ij} = diâmetro da i -ésima árvore na j -ésima posição (cm); h_{ij} = altura da i -ésima árvore na j -ésima posição (m); DAP_i = diâmetro da i -ésima árvore medido a 1,30 m do solo (cm); Ht_i = altura total da i -ésima árvore (m); I_i = idade (anos); β_i = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

Sendo o volume obtido pela integral do modelo (1), dada por:

$$\hat{V}_j = K \int_{h_1}^{h_2} d_{ij}^2 \Delta h$$

Em que: \hat{V}_j = volume estimado da j -ésima árvore (m³); $K = \frac{\pi}{40000}$; h_1 e h_2 = limites da integração (m); d_{ij} = estimativa do d_i na j -ésima posição (cm), dado pelo modelo de perfil (1).

Com o objetivo de melhorias na qualidade do ajuste do modelo (1), foi utilizada a teoria dos modelos lineares generalizados mistos, em que foram definidos todos os parâmetros do modelo (1) como efeito fixo e as árvores como um componente aleatório.

O modelo linear misto pode ser generalizado pela seguinte formulação.

$$Y_i = X_i \beta + Z_i b_i + \varepsilon_i$$

Sendo:

Y_i = vetor de dimensão $(t_i \times 1)$ da variável di ; X_i = matriz de dimensão $(t_i \times p)$

em que t_i = linhas com valores observados de $\frac{hi}{ht} DAP$, e p = colunas de

covariáveis ou variáveis independentes, incluindo a coluna de intercepto; β = vetor de dimensão $(p \times 1)$, representando os parâmetros de efeito fixo; Z_i = matriz representativa dos efeitos aleatórios de dimensão $(t_i \times k)$, conectando Y_i com os efeitos aleatórios de b_i com dimensão $(p \times l)$ representando o parâmetro estimado para o efeito aleatório da i -ésima árvore.

4.4 Modelagem da densidade por árvore individual

As variações da densidade ao longo do perfil das 46 árvores amostradas são mostradas pela figura 2.

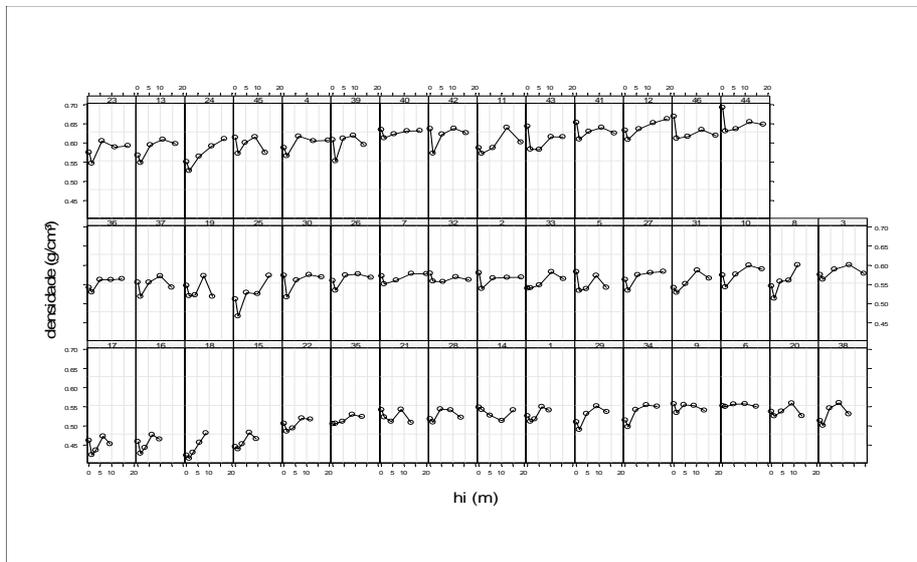


FIGURA 2 Variação da densidade ao longo do fuste.

É possível verificar pela figura 2, uma tendência de não linearidade nos dados. Um modelo não linear que represente este comportamento foi proposto por Ratkowsky (1989), dado por:

$$\rho_{ij} = \frac{\phi_1 + h_{ij}}{1 + \phi_2 h_{ij} + \phi_3 h_{ij}^2} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Segundo o mesmo autor, o modelo é caracterizado por ser não linear e capaz de ter no seu ponto de máximo, um mínimo, bem como pontos de inflexão.

Com o objetivo de melhorar a precisão e inserir variáveis que também explicam as variações da densidade em nível árvore individual e povoamento, os parâmetros do modelo (2) foram decompostos gerando o seguinte modelo completo, dado por:

$$\rho_{ij} = \frac{(\phi_0 + \phi_{11} I_i + \phi_{12} CLD_i + \phi_{13} IS_i) + h_{ij}}{1 + (\phi_{20} + \phi_{21} I_i + \phi_{22} IS_i + \phi_{23} CLD_i + \phi_{24} CLH_i) h_{ij} + ((\phi_{30} + \phi_{31} CLH_i) h_{ij}^2)} + \varepsilon_{ij} \quad (2.1)$$

Em que:

ρ_{ij} = densidade da i-ésima árvore observada na j-ésima posição (g.cm^{-3}); h_{ij} = altura da i-ésima árvore observada na posição j-ésima (m); CLD_i = classe de diâmetro da i-ésima árvore variando de 7,5 a 22,5 cm; CLH_i = classe de altura da i-ésima árvore variando de 12,5 a 27,5 m; IS_i = índice de sítio aos 7 anos da i-ésima unidade amostral; ϕ_i = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

Para ajuste do modelo (2.1), foi utilizada a teoria dos modelos não lineares generalizados mistos, considerando cada árvore amostrada como um efeito aleatório. Foram também adicionadas ao processo de modelagem,

variáveis em nível árvore individual e povoamento, quando foram decompostos os parâmetros β_1 , β_2 e β_3 através de inclusão de covariantes. Neste processo, foram inseridos o efeito da idade, índice de sítio, classe diamétrica e classe de altura na parte fixa do modelo.

4.5 Estimativa da massa por árvore individual

Por definição sabe-se que:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Em que:

ρ = densidade; m = massa; v = volume.

Devido às variações da densidade ao longo do fuste, o modelo (2.1) é proposto na estimativa da densidade nos diversos pontos da árvore junto com o modelo de perfil (1) para estimativa do diâmetro. A massa por árvore individual é obtida por:

$$Mt_i = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} * (h_{i+1} - h_i) * \frac{\rho_i + \rho_{i+1}}{2} \right) + M_{75\%}$$

Em que:

Mt = massa total da i -ésima árvore (g); g_i e g_{i+1} = área seccional na i -ésima e na i -ésima posição +1 respectivamente (cm²); h_i e h_{i+1} = comprimento da seção (cm); ρ_i e ρ_{i+1} = densidade básica na i -ésima e i -ésima posição +1 (g.cm⁻³). Sendo que i varia de 1 à 5 nas posições da base, DAP, 25, 50 e 75% da altura total (Ht).

Na posição de 75% da Ht , a massa é obtida por:

$$Mi_{75\%} = \frac{1}{3} gi_{75\%} * (Ht_i - h_{i75\%}) * \rho_{i75\%}$$

Sendo:

$Mi_{75\%}$ = massa da i -ésima árvore na posição 75% da Ht (g); $gi_{75\%}$ = área seccional da i -ésima árvore na posição de 75% da Ht (cm²); $hi_{75\%}$ = altura da i -ésima árvore na posição 75% da Ht (m); $\rho_{i75\%}$ = densidade básica da i -ésima árvore na posição 75% da Ht (g.cm⁻³)

A metodologia proposta para estimativa da massa por árvore individual pode ser generalizada pela seguinte integral:

$$M_t = k \int_0^{Ht} d_{ij}^2 * \rho_{ij} * \Delta h$$

Em que $k = \frac{\pi}{40000}$ e os valores de d_{ij} e ρ_{ij} são estimados pelos modelos

(1) e (2.1), respectivamente.

De acordo com a integração do modelo de estimativa da variação da densidade no fuste, bem como a estimativa volumétrica dada pelo modelo de perfil, é possível gerar massa ponderada por árvore individual. Tal metodologia é de grande relevância visto que existe um comportamento definido na variação da densidade, bem como na forma da árvore e há ainda os trabalhos que envolvem este tipo de situação, extrapolando a densidade obtida no DAP para toda a árvore, gerando erros de sub ou super estimativas.

4.6 Estimativa do estoque energético por árvore individual

Foi proposto o uso de um modelo de comportamento semelhante ao modelo do volume em função do DAP e Ht proposto por Schumacher & Hall (1933), conforme observado pela figura 3, dado por:

$$Y_i = \beta_0 X_{1i}^{\beta_1} X_{2i}^{\beta_2} * \varepsilon_i \quad (3)$$

Sendo:

Y_i = energia da i-ésima árvore (toneladas de caloria); X_{1i} = diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore (cm); X_{2i} = Altura total da i-ésima árvore (m); β_i = parâmetros a serem estimados; ε_i = erro aleatório.

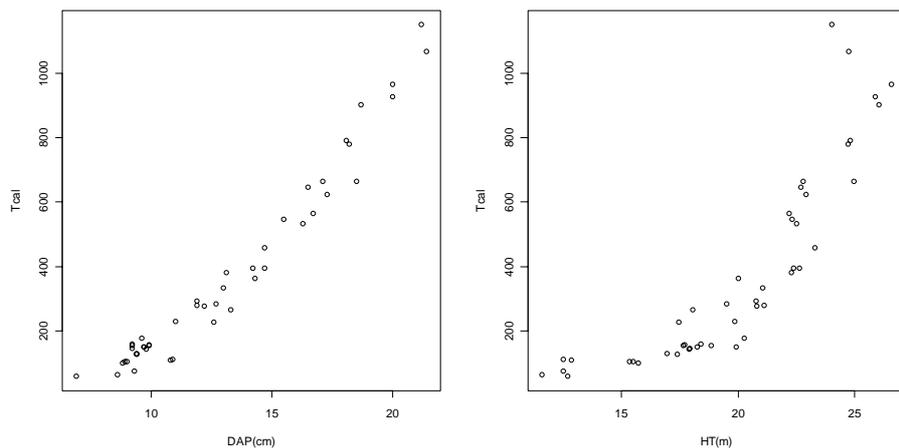


FIGURA 3 Tendência do comportamento em energia por árvore individual em função do DAP e Htotal.

Com o objetivo de generalizar o modelo (3) e torná-lo de mais fácil aplicação, foram inseridos o efeito da idade e do sítio como covariantes no parâmetro β_0 por meio de técnicas de decomposição de parâmetros, dada pela função *gnls* do pacote *nlme* implementado no software estatístico R, versão 2.9.2. O modelo completo (3.1) é então escrito por:

$$Y_i = (\beta_{00} + \beta_{01}I_i + \beta_{02}IS_i) * DAP_i(\beta_{10} + \beta_{11}I_i + \beta_{12}IS_i) * Ht_i(\beta_{20} + \beta_{21}I_i + \beta_{22}IS_i) * \varepsilon_i \quad (3.1)$$

Em que: I = idade da i -ésima árvore (anos); IS = índice de sítio aos 7 anos da i -ésima unidade amostral (m).

4.7 Modelagem da variância para dados heterocedásticos

Uma situação de heterocedasticidade muito comum em dados biométricos florestais é a variância do tipo funil crescente. Para os casos em que foi necessária a modelagem da variância, foi utilizado um modelo de variância proposto por Pinheiro & Bates (2009), dado por:

$$Var(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2 |\nu_{ij}|^{2\delta}$$

Correspondida pela seguinte função de variância:

$$g(\nu_{ij}, \delta) = |\nu_{ij}|^\delta$$

Em que, ν_{ij} é um poder do valor absoluto variância da covariante. O parâmetro δ é irrestrito, ou seja, pode assumir qualquer valor real e assim pode modelar casos onde a variância aumenta ou diminui com o valor absoluto da variância da covariante. Trabalhos que envolvem este tipo de modelagem podem ser também encontrados em Carvalho et al. (2009) e Zeviani et al. (2009).

4.8 Modelagem do crescimento e da produção calorimétrica

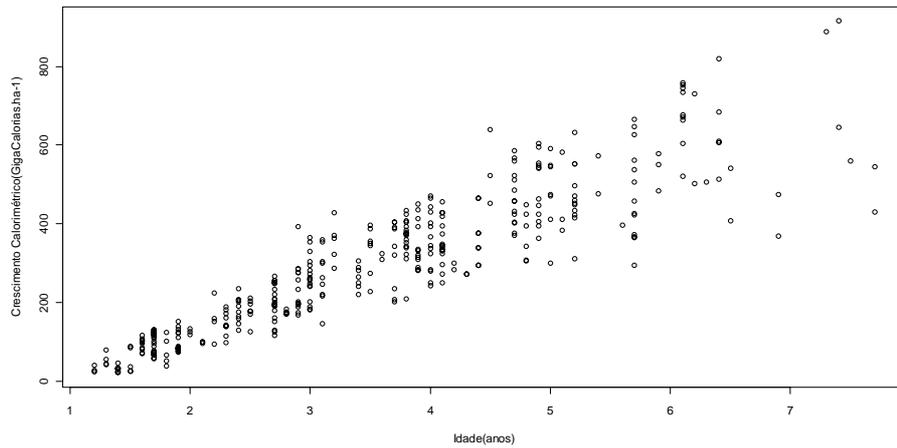


FIGURA 4 Plot dos dados brutos para escolha do modelo de projeção calorimétrica.

É possível verificar pela figura 4 uma tendência de comportamento não linear nos dados de crescimento calorimétrico. Um modelo não linear que explique esta relação, segundo Pinheiro & Bates (2009) é dado por:

$$Y_i = \phi_1 \{1 - \exp[-\exp(\phi_2)(X_i - \phi_3)]\} + \varepsilon_i \quad (4)$$

Trata-se de um modelo já implementado no software R, sendo de fácil ajuste, dado pelo argumento *SsasymptOff*, em que a função *self start* com base no comportamento das variáveis propostas fornece um chute inicial para os parâmetros, visto que uma das grandes dificuldades de se trabalhar com modelos não lineares é a questão dos chutes iniciais dos parâmetros.

Em relação à interpretação dos parâmetros, ϕ_1 representa o parâmetro assintótico quando $x \rightarrow \infty$. ϕ_2 corresponde ao parâmetro de “meia vida”, ou seja, o ponto onde $t = 0,5$ e ϕ_3 é o parâmetro de valor de x para $y = 0$.

Para os dados de crescimento calorimétrico, tem-se:

Y_i = valor energético em gigacalorias por hectare da i -ésima unidade amostral;
 X_i = idade em anos.

O modelo (4) foi reestruturado com a finalidade de melhorar a precisão e inserir variáveis que explicam as variações de Y . Foram adicionados o efeito do número de fustes por hectare (N) e o índice de sítio como covariantes no parâmetro assintótico (ϕ_1), ficando o modelo completo expresso por:

$$Y_i = \left(\phi_{10} + \phi_{11}N_i + \phi_{1i} \sum_{i=1}^4 IS_i \right) \{1 - \exp[-\exp(\phi_2)(X_i - \phi_3)]\} + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Em que:

$\sum_{i=1}^n \phi_{1i} IS$ = parâmetro com uma variável indicadora dummy associada ao i -th

índice de sítio, com valor 1 para o i -th índice de sítio e 0 para os demais.

A figura 5 ilustra a tendência no comportamento para o crescimento e produção calorimétrica nos diferentes sítios.

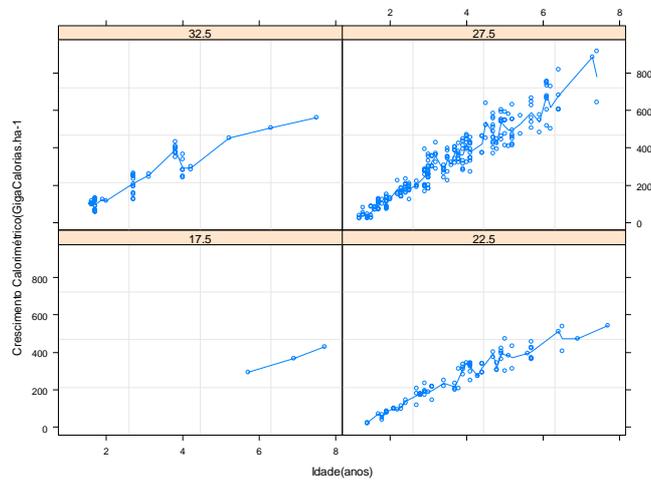


FIGURA 5 Variação do crescimento calorimétrico para os diferentes sítios.

É possível verificar que há uma variação nos diferentes sítios e que, pelas características do modelo assintótico proposto, este se adequa bem a situação do crescimento calorimétrico nos diferentes sítios

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Modelagem do perfil

As tabelas 3 e 4 fornecem a seleção baseada em testes estatísticos para o modelo de perfil. Tais saídas são de grande relevância quando se trata de análise da regressão, pois fornecem valores de erro padrão e critérios penalizadores de seleção de modelos.

TABELA 3 Análise da variância para seleção do modelo de perfil.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	logLik	TRMV	p-valor
Misto	14	1186,65	1245,62	-579,32	---	
Fixo	8	2709,68	2743,38	-13,4683	1535,03	<0,0001

TABELA 4 Erro padrão e erro padrão percentual para o modelo misto de perfil.

Modelo	Syx (cm)	Syx (%)
Fixo para afilamento	3,478	38,99
Misto para Afilamento	0,5601	6,27

O modelo misto para modelagem do perfil de *Eucalyptus* é o mais indicado conforme resultados encontrados nas tabelas 3 e 4. De acordo com a tabela 4, é possível verificar que o erro de estimativa foi reduzido de 39 para aproximadamente 6%, por meio de técnicas computacionais. Resultados semelhantes foram também encontrados por Horle (2007), em que o autor trabalhou com a teoria dos modelos de efeito misto na modelagem do perfil de *Pinus oocarpa*.

Na figura 6, a seguir são mostrados os gráficos de resíduos padronizados para os modelos ajustados na estimativa do perfil das árvores amostradas.

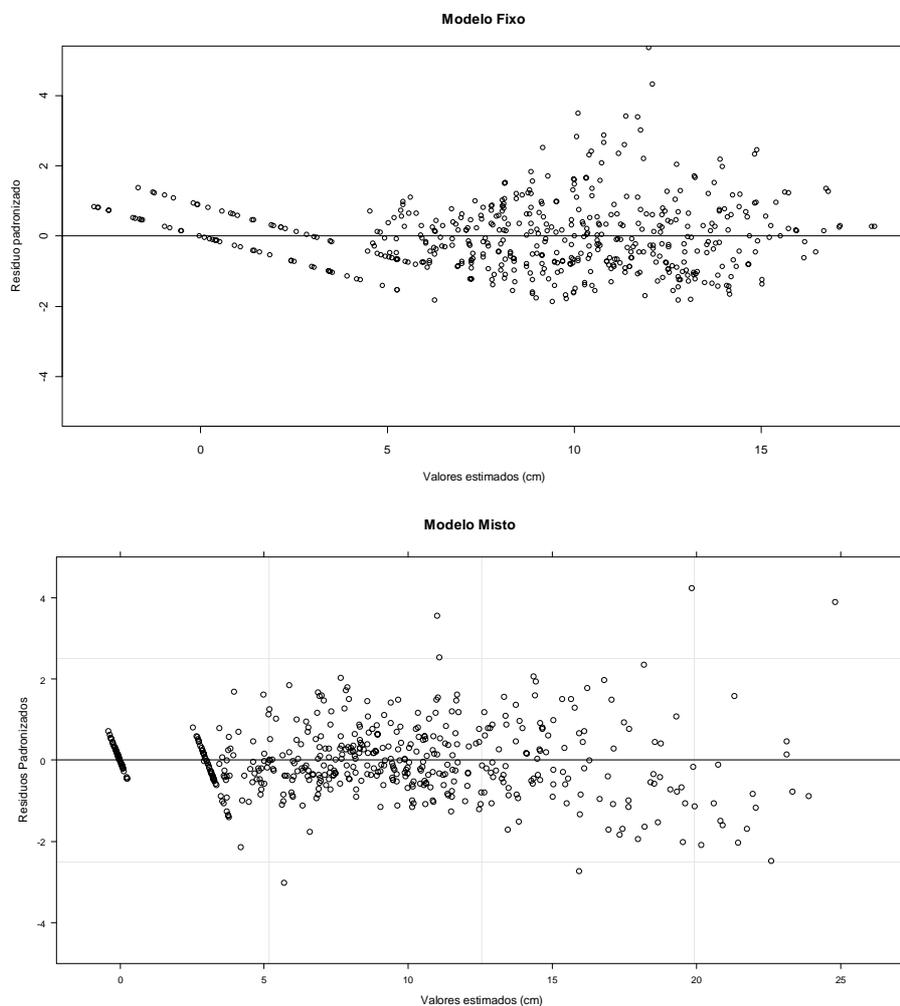


FIGURA 6 Resíduos para os modelos de perfil ajustados.

A figura 6 confirma a boa qualidade de ajuste do modelo misto, gerando resíduos com distribuição aproximadamente normal, média zero, variância constante σ^2 e identicamente distribuídos. Conclusões semelhantes não podem ser tiradas para o modelo linear simples, pois apresenta resíduos com uma tendência do tipo correlação.

A tabelas 5 e 6 fornecem os parâmetros para estimativa do perfil via modelo misto, selecionado conforme resultados anteriores obtidos pelas tabelas 3 e 4, e pelos gráficos da figura 6.

TABELA 5 Parâmetros do efeito fixo para o modelo polinomial de 5° grau.

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
β_0	11,03473	0,847016	13,02776	< 0,0001
β_1	-3,35776	0,160706	-20,8938	< 0,0001
β_2	12,58882	1,121238	11,22761	< 0,0001
β_3	-26,669	2,984191	-8,93676	< 0,0001
β_4	25,75958	3,352301	7,684148	< 0,0001
β_5	-9,51699	1,337593	-7,11501	< 0,0001
β_6	0,731559	0,191871	3,812768	< 0,0001

TABELA 6 Parâmetros do efeito fixo e aleatório adicionado nos termos de intercepto e no parâmetro β_1 para o modelo polinomial de perfil.

Arvore	β_0 fixo	β_0 aleatório	β_1 fixo	β_1 aleatório	β_6 fixo	β_6 aleatório
1	11,03473	-0,28259	-3,35776	-0,02697	0,731559	-1,01255
2	11,03473	0,117075	-3,35776	0,024883	0,731559	0,408129
3	11,03473	0,226607	-3,35776	0,02221	0,731559	0,811456
4	11,03473	0,173006	-3,35776	0,038017	0,731559	0,602074
5	11,03473	-0,16665	-3,35776	-0,0171	0,731559	-0,59612
6	11,03473	-0,12435	-3,35776	-0,00553	0,731559	-0,45079
7	11,03473	0,23247	-3,35776	0,02123	0,731559	0,83374
8	11,03473	-0,20663	-3,35776	-0,02016	0,731559	-0,74002
9	11,03473	-0,19056	-3,35776	-0,02293	0,731559	-0,67871
10	11,03473	0,048853	-3,35776	0,003432	0,731559	0,176015
11	11,03473	0,203585	-3,35776	0,0309	0,731559	0,719839
12	11,03473	0,19755	-3,35776	0,027834	0,731559	0,700269
13	11,03473	-0,01725	-3,35776	0,004845	0,731559	-0,06714
14	11,03473	-0,16361	-3,35776	-0,01076	0,731559	-0,59007
15	11,03473	0,112447	-3,35776	-0,00518	0,731559	0,412837
16	11,03473	0,074101	-3,35776	-0,00735	0,731559	0,274961
17	11,03473	-0,15662	-3,35776	-0,02341	0,731559	-0,55238

... continua ..

TABELA 6, cont.

Arvore	β_0 fixo	β_0 aleatório	β_1 fixo	β_1 aleatório	β_6 fixo	β_6 aleatório
18	11,03473	-0,23819	-3,35776	-0,02764	0,731559	-0,84595
19	11,03473	-0,21676	-3,35776	-0,02037	0,731559	-0,77531
20	11,03473	0,177974	-3,35776	0,018834	0,731559	0,634921
21	11,03473	0,109817	-3,35776	0,009083	0,731559	0,39377
22	11,03473	-0,20875	-3,35776	-0,02613	0,731559	-0,74153
23	11,03473	0,194097	-3,35776	0,035464	0,731559	0,681266
24	11,03473	0,041097	-3,35776	0,018082	0,731559	0,135584
25	11,03473	-0,17036	-3,35776	-0,00764	0,731559	-0,6172
26	11,03473	0,06546	-3,35776	0,025151	0,731559	0,218949
27	11,03473	0,150284	-3,35776	0,021634	0,731559	0,532257
28	11,03473	-0,16283	-3,35776	-0,0039	0,731559	-0,59271
29	11,03473	-0,15537	-3,35776	-0,01148	0,731559	-0,55906
30	11,03473	0,219778	-3,35776	0,021319	0,731559	0,786682
31	11,03473	-0,01578	-3,35776	0,004484	0,731559	-0,06141
32	11,03473	0,315699	-3,35776	0,015387	0,731559	1,142452
33	11,03473	0,02908	-3,35776	0,000386	0,731559	0,106075
34	11,03473	-0,16078	-3,35776	-0,00562	0,731559	-0,58365
35	11,03473	-0,1744	-3,35776	-0,02441	0,731559	-0,61774
36	11,03473	0,088885	-3,35776	0,005585	0,731559	0,320308
37	11,03473	0,212757	-3,35776	0,003252	0,731559	0,774779
38	11,03473	-0,17303	-3,35776	-0,01469	0,731559	-0,62048
39	11,03473	-0,19514	-3,35776	-0,02667	0,731559	-0,69261
40	11,03473	0,075048	-3,35776	-0,00282	0,731559	0,277247
41	11,03473	0,028602	-3,35776	0,005096	0,731559	0,100532
42	11,03473	-0,10452	-3,35776	-0,00521	0,731559	-0,37854
43	11,03473	-0,09065	-3,35776	-0,00292	0,731559	-0,32962
44	11,03473	0,243567	-3,35776	-0,01929	0,731559	0,908225
45	11,03473	-0,1939	-3,35776	-0,02369	0,731559	-0,69056
46	11,03473	0,230887	-3,35776	0,004764	0,731559	0,841776

Apesar da complexidade da saída gerada pela técnica de modelagem de regressão mista conforme observado pelas tabelas 5 e 6, esta é atualmente passível de implementação via programação computacional, devido aos avanços tecnológicos relacionados à informática.

5.2 Modelagem da densidade

As tabelas 7 e 8 fornecem as estatísticas para seleção do modelo a ser utilizado na estimativa da densidade.

TABELA 7 Análise da variância para seleção do modelo de densidade.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	logLik	TRMV	p-valor
Fixo (1)	4	-736,6637	-722,911	372,3319		
Misto (2)	18	-1035,19	-973,31	535,59	326,5281	< 0,0001

TABELA 8 Erro padrão e erro padrão residual para os modelos de densidade.

Modelo	Syx (g.cm⁻³)	Syx (%)
Fixo	0,048260	8,6668
Misto	0,023573	4,2334

Uma análise gráfica justificando a adição do efeito aleatório no processo de modelagem, caracterizando um modelo de efeito misto, é mostrada pela figura 7.

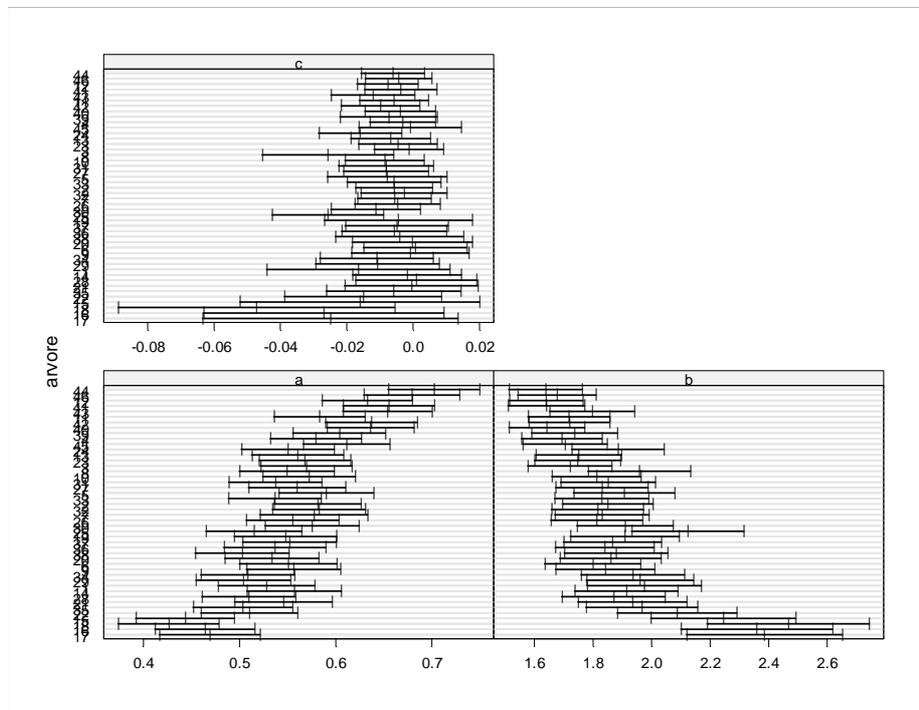


FIGURA 7 Plot dos intervalos com 95% de confiança para o modelo fixo de densidade.

Verifica-se pela figura 7 um comportamento de aleatoriedade das árvores dentro dos parâmetros do modelo fixo na estimativa da densidade. Esta é mais uma justificativa de preferência e uso do modelo de efeito misto na modelagem da densidade, retratando a verdadeira originalidade dos dados.

Conforme as tabelas 7 e 8, foi possível obter uma melhoria de ajuste em torno de 50% quando utilizada a teoria dos modelos não lineares de efeito misto com decomposição dos parâmetros da parte fixa na modelagem da densidade.

A boa qualidade de ajuste do modelo misto para densidade é também verificada pela saída gráfica gerada pelas figuras 8, 9 e 10.

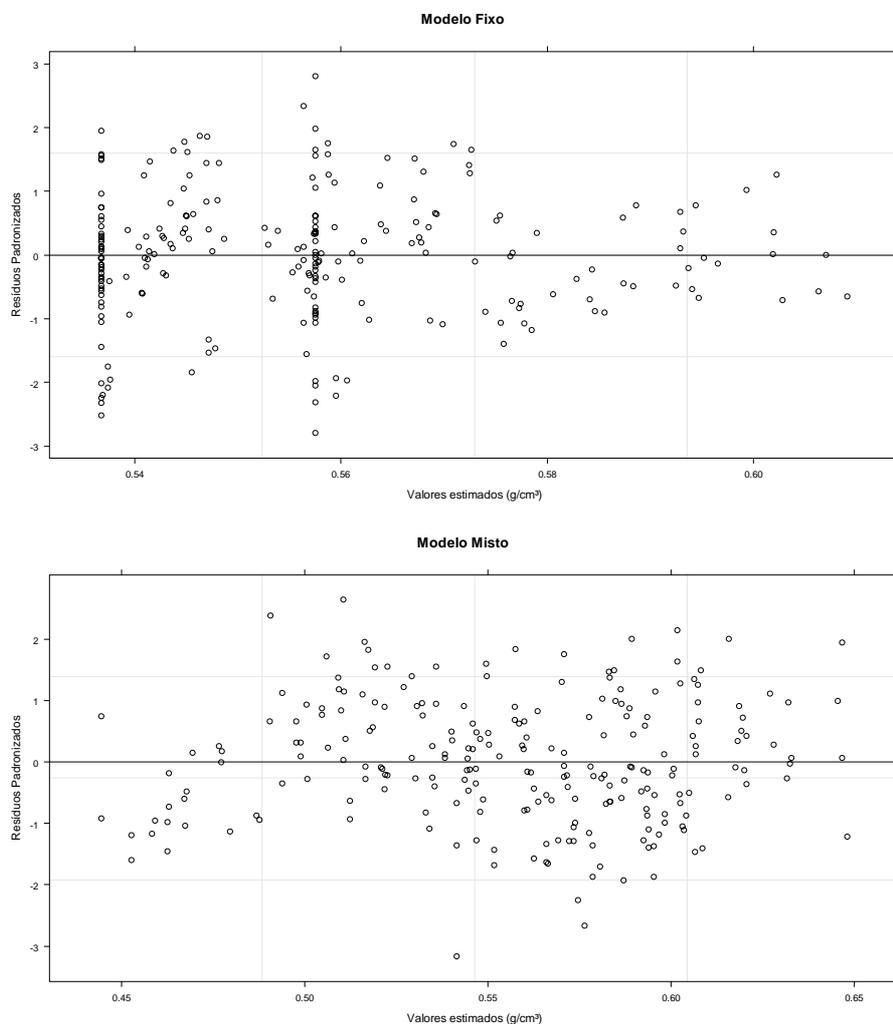


FIGURA 8 Gráfico de resíduos para o modelo fixo e misto aplicados para estimativa da densidade.

Verifica-se uma melhoria na distribuição dos resíduos quando inserido o termo aleatório no modelo em que estes tendem a estar distribuídos de uma maneira idêntica em torno do zero.

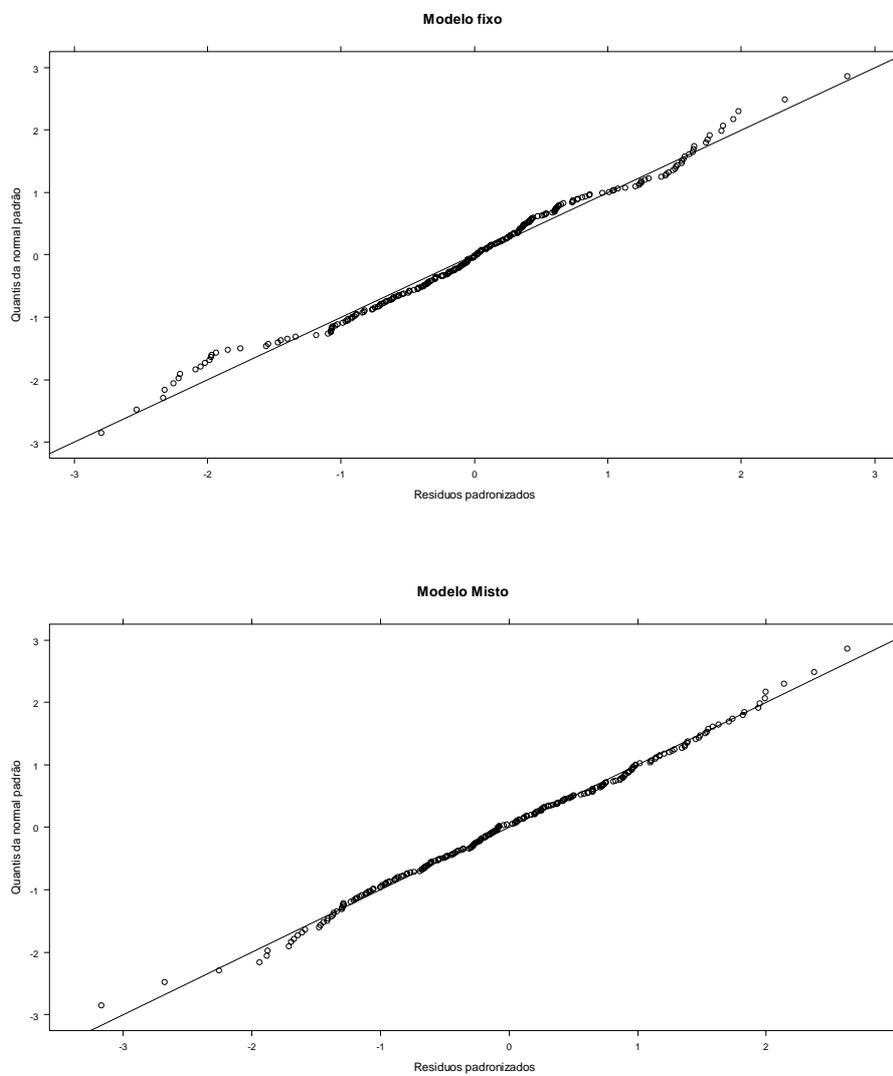


FIGURA 9 Quantis da distribuição normal para os modelos ajustados na estimativa da densidade.

É possível observar pelo gráfico quantil-quantil da figura 9 que a regressão mista fez com que os pontos se concentrassem em maior número na linha de 45° (0,1) caracterizando a normalidade dos resíduos.

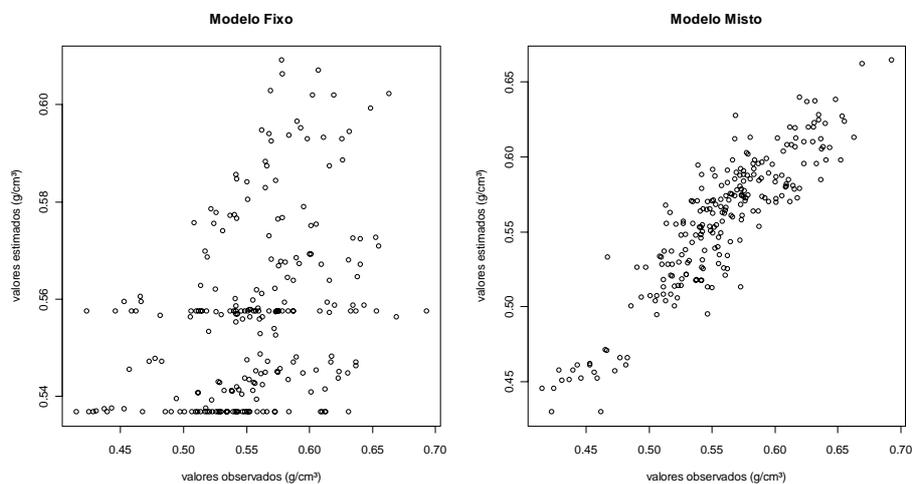


FIGURA 10 Plot dos valores observados versus estimados para seleção do modelo de estimativa da densidade.

De acordo com a saída gráfica da figura 10 de valores observados versus valores estimados, é possível verificar uma melhoria visivelmente significativa quando comparados os modelos de efeito fixo e de efeito misto, em que este último tende a gerar valores estimados bem próximos aos valores observados, conclusão esta que não pode ser obtida para o modelo fixo.

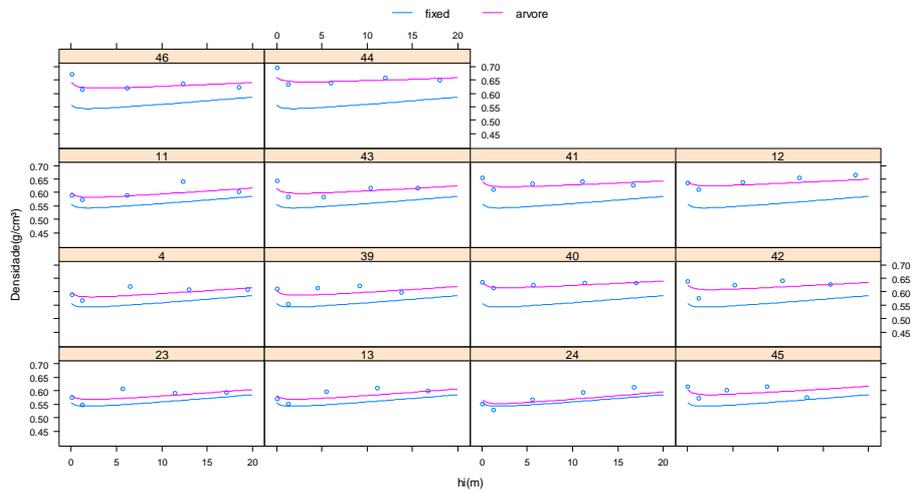


FIGURA 11 Flexibilidade do modelo misto ajustado para estimativa da densidade.

Conforme pode ser observado pela figura 11, quando comparada à regressão fixa, a regressão mista se mostra altamente eficaz, pois gera uma melhora significativa nas estimativas com a adição do termo aleatório. Este fato se deve a condição de que a adição do termo aleatório faz com que a curva média se desloque na base de dados gerando estimativas bem próximas aos valores observados.

Os parâmetros com suas respectivas significâncias do modelo misto para estimativa da densidade são mostrados na tabela 9.

TABELA 9 Parâmetros do modelo misto selecionado para estimativa da densidade.

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
β_{10} (intercepto)	0,5795591	0,059569	9,729197	< 0,0001
β_{11} *ida	0,0126104	0,002852	4,42184	< 0,0001
β_{12} *Sitio	-0,005882	0,001839	-3,19816	0,0016
β_{13} *CLD	0,0042431	0,000981	4,323598	< 0,0001
β_{20} (intercepto)	1,9374847	0,137862	14,05376	< 0,0001
β_{21} *ida	-0,025944	0,004704	-5,51555	< 0,0001
β_{22} *Sitio	0,0158936	0,003069	5,179206	< 0,0001
β_{23} *CLD	-0,0056	0,001979	-2,82944	0,0052
β_{27} *CLH	-0,012396	0,004191	-2,95784	0,0035
β_{30} (intercepto)	-0,024299	0,008193	-2,96592	0,0034
β_{31} *CLH	0,0007983	0,000371	2,150618	0,0329

5.3 Estimativa do estoque energético por árvore individual

As tabelas 10 e 11 apresentam as estatísticas para seleção dos modelos ajustados na estimativa calorimétrica por árvore individual.

TABELA 10 Valores de erro padrão e erro padrão residual para o modelo não linear simples e não linear generalizado na estimativa energética por árvore individual.

Modelo	Syx (tonelada de calorias)	Syx (%)
Simple	32,92	8,7172
Completo Heterocedástico	25,247	6,6850

TABELA 11 Saída de análise da variância para seleção do modelo na estimativa energética por árvore individual.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	logLik	TRMV	pvalue
Simple	4	456,891	464,206	-224,446		
Completo Heterocedástico	6	379,151	399,266	-178,575	91,74	<.0001

Os valores das estatísticas de erro padrão, critério de Akaike e Bayesiano e teste da razão da máxima verossimilhança dados pelas tabelas 10 e 11 mostram que o modelo completo heterocedástico é preferível para a estimativa de valores calorimétricos em tonelada por árvore. Estes resultados demonstram o efeito significativo das variáveis idade e sítio, melhorando a estrutura e precisão do modelo.

Resultados semelhantes podem ser obtidos pela saída gráfica dos resíduos padronizados, em que se verifica uma melhora significativa na distribuição dos resíduos, dado pela figura 11, em que o efeito da variância não constante do tipo funil crescente foi corrigida.

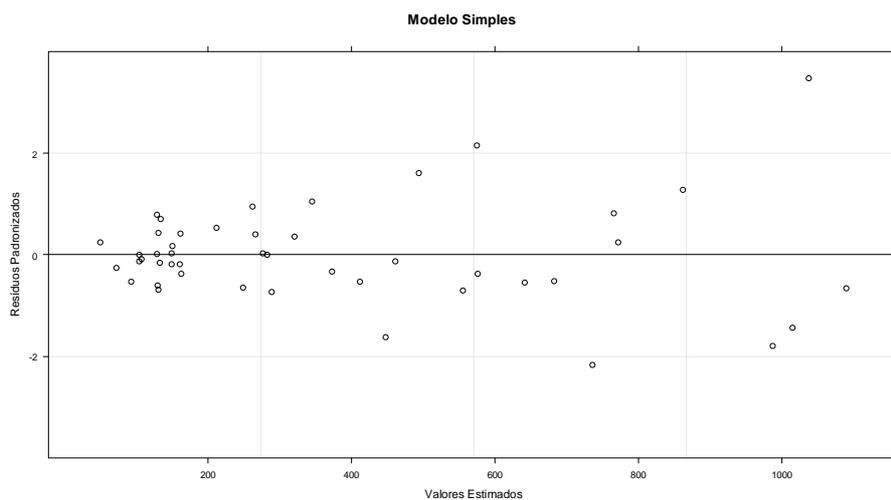
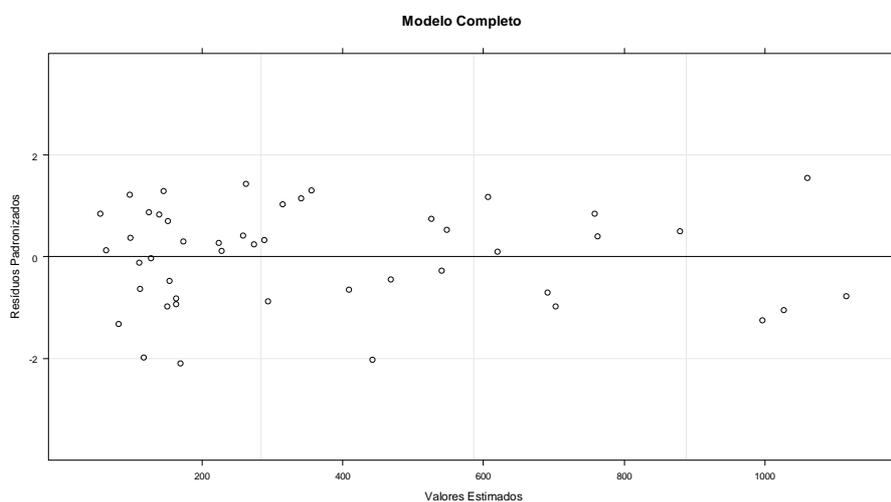


FIGURA 12 Gráfico de resíduos para ajuste dos modelos de estoque em energia
(... continua ...)

FIGURA 12, cont.



De acordo com os gráficos de resíduos dos modelos ajustados na estimativa calorimétrica por árvore individual, pode-se assumir que a adição da função de variância fez com que as pressuposições básicas de análise da regressão de $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ e identicamente distribuídos, foram assumidas, corrigindo o efeito da heterocedasticidade do tipo funil crescente.

Os parâmetros do modelo completo heterocedástico com suas respectivas estatísticas de erro padrão e valor da distribuição “t” são dados pela tabela 12.

TABELA 12 Parâmetros do modelo completo para estimativa do estoque de energia árvore individual.

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
β_{00} (Intercepto)	0,391941	0,112758	3,475953	0,0013
β_{01} ida	-0,00752	0,002263	-3,32187	0,002
β_{02} Sítio	-0,00952	0,003085	-3,0871	0,0038
β_{10} (Intercepto)	3,116956	0,667297	4,671018	0
β_{11} ida	-0,04648	0,031017	-1,49863	0,1425
β_{12} Sítio	-0,03029	0,021254	-1,4252	0,1625
β_{20} (Intercepto)	-0,97338	0,593768	-1,63932	0,1096
β_{21} ida	0,075386	0,029121	2,58868	0,0137
β_{22} Sítio	0,055821	0,019052	2,929909	0,0058

Por meio dos resultados da tabela 12, verificou-se que todos os parâmetros são significativos a um nível aproximado de 15% de significância, conforme valores de “t”, implicando que o efeito das covariantes é significativo e melhora a qualidade de explicação do modelo.

5.4 Modelagem do crescimento e produção calorimétrica

As tabelas 13 e 14 apresentam as estatísticas de avaliação e qualidade de ajuste dos modelos propostos para modelagem da projeção calorimétrica.

TABELA 13 Erro padrão e erro padrão residual para o modelo simples, completo e completo heterocedástico ajustados para projeção calorimétrica.

Modelo	Syx (gigacaloria/ha)	Syx (%)
Simple	73,46	24,63
Completo	53,08	17,80

TABELA 14 Análise da variância para seleção do modelo para projeção calorimétrica.

Modelo	G.L.	AIC	BIC	logLik	TRMV	p-valor
Simple (1)	4	4463,21	4479,08	-2227,60		
Completo (2)	6	4234,89	4258,69	-2111,44	232,32	<.0001

Os resultados gerados pelas tabelas 13 e 14 apotam o modelo assintótico completo para estimativa do crescimento e produção em gigacalorias por hectare, por meio dos critérios de informação de Akaike, Bayesiano e TRMV sendo este valor obtido por: $TRMV = 2[2227,60 - 2111,44]$, além do erro padrão residual.

Os parâmetros para a curva média do modelo assintótico completo com suas respectivas estatísticas e significância são apresentados na tabela 15.

TABELA 15 Parâmetros para a curva média do modelo de crescimento e produção calorimétrica.

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	t-valor	p-valor
\square_{10} (intercepto)	1382,7527	422,3857	3,2736	0,0012
$\square_{10}N$	0,3103	0,1929	1,6090	0,1084
\square_2	-2,7146	0,2725	-9,9611	< 0,0001
\square_3	1,0319	0,0594	17,3761	< 0,0001

N = número de fustes por hectare

Os resultados obtidos na tabela 15 indicam que todos os parâmetros foram significativos a um nível de 15% de significância, implicando que os mesmos têm efeito significativo na projeção do crescimento e da produção calorimétrica.

Com a finalidade de aumentar a precisão do modelo inserindo variáveis que hipoteticamente explicam as variações do crescimento calorimétrico, foram adicionados ao sistema de modelagem o efeito do sítio, como uma variável de

produtividade e o número de fustes por hectare, como uma variável indicadora de densidade no parâmetro \square_{10} (assintota). Os valores correspondentes aos índices de sítio como uma variável dummy são mostrados na tabela 16.

TABELA 16 Termos adicionados ao parâmetro assintótico do modelo de crescimento e produção energética.

Parâmetro	Índice de Sítio	Valor
\square_{10} (intercepto)	17,5	-517,4434
\square_{10} (intercepto)	22,5	-128,5215
\square_{10} (intercepto)	27,5	475,8963
\square_{10} (intercepto)	32,5	170,0687

Melhorias encontradas quando inseridos o efeito do sítio e do número de fustes como um componente do modelo simples são verificadas pela figura 13.

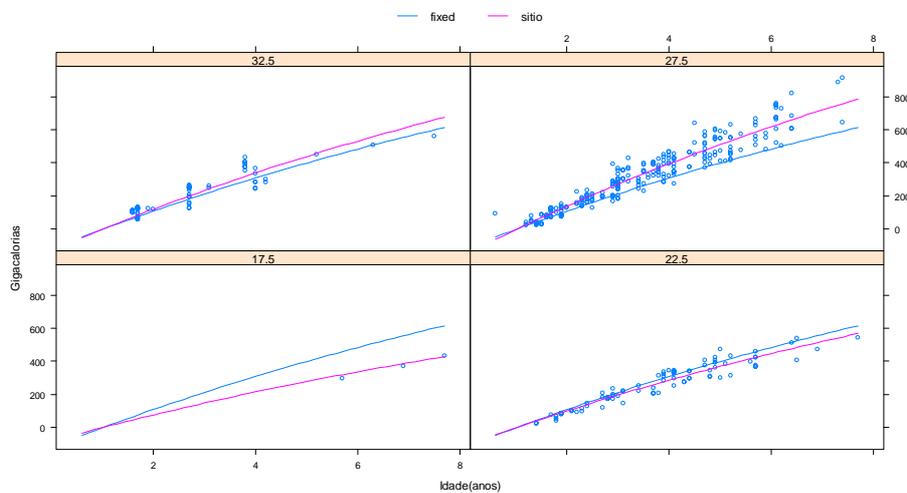


FIGURA 13 Comportamento do modelo completo para os diferentes sítios.

Analisada a figura 13, é possível verificar a grande flexibilidade do modelo completo na base de dados. Tal técnica de ajuste torna-se muito eficaz, pois faz com que o modelo represente valores médios para as diferentes combinações de sítio e densidade.

5.5 Aplicação do procedimento na construção de tabelas de projeção do crescimento e da produção calorimétrica em gigacalorias por hectare.

Com o objetivo de exemplificar todo o sistema de modelagem proposto neste estudo, foi selecionado um talhão para cada variação de índice de sítio na base de dados original, conforme a seguir.

TABELA 17 Tabela de produção normal gerada pelos modelos utilizados na projeção calorimétrica.

Talhão	Parcela	Id(anos)	N	S	Idades Prognosticadas							
					3	4	5	6	7	8	9	10
266	12	7,7	1250	17,5	146,21	213,51	276,50	335,45	390,62	442,26	490,59	535,82
				MÉDIA	146,21	213,51	276,50	335,45	390,62	442,26	490,59	535,82
34	11	5	1050	22,5	193,79	282,99	366,47	444,60	517,73	586,17	650,22	710,17
34	12	5	1100	22,5	195,68	285,76	370,06	448,95	522,80	591,90	656,58	717,12
				MÉDIA	194,74	284,37	368,26	446,78	520,26	589,04	653,40	713,65
37	9	4,7	1000	27,5	267,00	389,90	504,92	612,57	713,32	807,62	895,87	978,46
37	10	4,7	1050	27,5	268,89	392,66	508,50	616,92	718,39	813,35	902,23	985,41
37	11	4,7	1100	27,5	270,79	395,43	512,09	621,27	723,45	819,09	908,59	992,36
				MÉDIA	268,89	392,66	508,50	616,92	718,39	813,35	902,23	985,41
172	1	3,8	975	32,5	231,08	337,44	436,99	530,16	617,36	698,97	775,34	846,83
172	2	3,8	925	32,5	229,18	334,67	433,40	525,81	612,29	693,23	768,98	839,88
172	3	3,8	1050	32,5	233,92	341,60	442,37	536,68	624,95	707,57	784,89	857,25
172	4	3,8	1050	32,5	233,92	341,60	442,37	536,68	624,95	707,57	784,89	857,25
172	5	3,8	975	32,5	231,08	337,44	436,99	530,16	617,36	698,97	775,34	846,83
172	6	3,8	1025	32,5	232,97	340,21	440,58	534,51	622,42	704,70	781,71	853,78
172	7	3,8	1100	32,5	235,82	344,36	445,95	541,03	630,02	713,30	791,25	864,20
				MÉDIA	232,14	339,00	439,01	532,61	620,21	702,19	778,92	850,74

TABELA 18 Valores de incremento médio anual e incremento corrente anual em gigacaloria para os talhões aleatorizados na aplicação do procedimento para projeção calorimétrica.

Idade	Classes de Sítio											
	I			II			III			IV		
	Gcal.ha-1	IMA	ICA	Gcal.ha-1	IMA	ICA	Gcal.ha-1	IMA	ICA	Gcal.ha-1	IMA	ICA
3	232,14	77,38		268,89	89,63		194,74	64,91		146,21	48,74	
4	339,00	84,75	106,86	392,66	98,17	123,77	284,37	71,09	89,64	213,51	53,38	67,30
5	439,01	87,80	100,01	508,50	101,70	115,84	368,26	73,65	83,89	276,50	55,30	62,99
6	532,61	88,77	93,60	616,92	102,82	108,42	446,78	74,46	78,52	335,45	55,91	58,95
7	620,21	88,60	87,60	718,39	102,63	101,47	520,26	74,32	73,48	390,62	55,80	55,17
8	702,19	87,77	81,99	813,35	101,67	94,96	589,04	73,63	68,77	442,26	55,28	51,64
9	778,92	86,55	76,73	902,23	100,25	88,88	653,40	72,60	64,37	490,59	54,51	48,33
10	850,74	85,07	71,81	985,41	98,54	83,18	713,65	71,36	60,24	535,82	53,58	45,23

96

Os resultados da tabela 18 indicam que, para todos índices de sítio, os talhões devem ser cortados aos 6 anos, ou seja, rotação silvicultural de 6 anos, conforme crescimento em Gigacaloria prognosticado pelo modelo assintótico completo, sendo esta uma rotação bem próxima quando se trata de rotações volumétricas. Porém nestas, o efeito do sítio comumente é significativo.

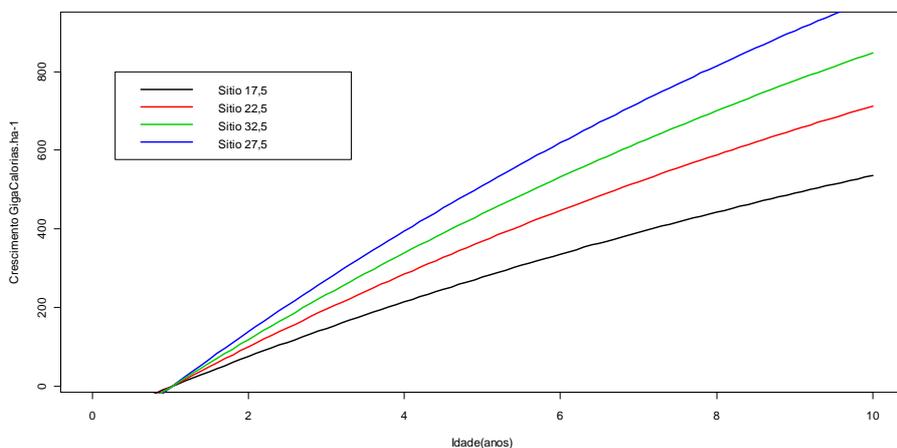


FIGURA 14 Projeção do crescimento calorimétrico.

Conforme a figura 14, o ponto de assíntota ainda não está bem definido, ou seja, a estabilidade de crescimento calorimétrico pode estar distante das rotações silviculturais quando se leva em consideração o crescimento volumétrico, que em geral é próximo aos 7 anos. Tal fato pode ser explicado por se tratar de árvores muito jovens quando se pensa em 7 anos ou menos, quando as plantas ainda estão armazenando energia (cerne), algo desejável em florestas que visam a produção de energia. Portanto, a idéia é compatibilizar crescimento em volume e energia.

Verifica-se também um comportamento atípico para os índices de sítio 27,5 e 32m, sendo que o de 27,5 armazena mais energia. Algumas hipóteses podem ser levantadas para esta situação, sendo: a) acelerado crescimento volumétrico para sítios muito produtivos acarretando reduzida produção de cerne ou madeiras maduras; b) povoamentos muito espaçados para sítios com alta capacidade produtiva, o que em geral é sugerido.

6 CONCLUSÕES

Os modelos propostos na estimativa do afilamento, da densidade e no crescimento calorimétrico se mostraram com uma boa performance, parcimoniosos, altamente precisos.

A técnica de modelagem de regressão generalizada e generalizada mista é altamente aplicável em modelos biométricos florestais, gerando modelos altamente precisos e que retratam muito bem a realidade dos dados, sendo também mais uma ferramenta de suporte ao manejo florestal.

Por meio de técnicas computacionais, foi possível conseguir melhorias nas estimativas em torno de 50%, além de ter sido possível atender a todas as pressuposições básicas de análise de regressão.

Apesar da complexidade da saída gerada pela técnica de ajuste dos modelos mistos, atualmente esta é facilmente implementada via programação devido aos avanços da informática ocorridos nas últimas décadas.

A metodologia proposta para estimativa da massa via modelagem da variação da densidade básica ao longo do perfil é de grande relevância, pois trabalhos que envolvem a modelagem da densidade levam em consideração apenas aquela obtida no DAP ou ainda uma densidade média multiplicada pelo volume da árvore, podendo ocasionar erros bem significativos quando se tratar de extrapolações para grandes áreas, o que comumente caracteriza um empreendimento florestal.

O sistema de modelagem do crescimento e produção em energia sugere 6 anos como rotação silvicultural para todos os sítios. Este comportamento pode estar relacionado com a baixa faixa de variação encontrado nos valores de poder calorífico. Quando se tratar de florestas para fins energéticos deve-se ater às generalizações e às técnicas de manejo a serem aplicadas, pois o objetivo é compatibilizar crescimento em volume e incremento calorimétrico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

CARVALHO, S. P. C.; SENA, A. L. M.; VELOSO, R. B.; CALEGARIO, N. Efeito da heterocedasticidade na estimativa do volume individual de árvores. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 54., 2009, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2009. 1 CD-ROM.

HORLE, D. C. **Modelo linear e não-linear na estimativa do perfil de *Pinus oocarpa***. 2007. 33 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2009.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 2009. 528 p.

RATKOWSKY, D. A. **Handbook of nonlinear regression models**. New York: M. Dekker, 1989. 241 p.

RUFINI, A. L. **Volúmetria, peso de matéria seca, teor de tanino e cortiça para o Cerrado *Sensu Stricto* em Minas Gerais**. 2008. 293 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad**. Berlin: Wurt-Forstl, 1966. No page.

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

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G. Modelos para estimar a parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 179-189, jul./dez. 1996.

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus* sp.** 2002. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

TRUGILHO, P. F. Basic density and dry mass and lignin mass estimate in Eucalyptus wood species. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, set./out. 2009.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, jan./mar. 2006.

ZEVIANI, W. M.; CABRINI, E. C.; MUNIZ, J. A. Estudo do crescimento de frutos de goiaba por modelos não lineares com modelagem da variância. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 54., 2009, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2009. 1 CD-ROM.