

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

IAN PEREIRA SARTÓRIO

AVALIAÇÃO E MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE FLORESTAS  
ENERGÉTICAS DE EUCALIPTO PLANTADAS EM DIFERENTES DENSIDADES

CURITIBA

2014

IAN PEREIRA SARTÓRIO

AVALIAÇÃO E MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE FLORESTAS  
ENERGÉTICAS DE EUCALIPTO PLANTADAS EM DIFERENTES DENSIDADES

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Co-orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

CURITIBA

2014

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Sartório, Ian Pereira

Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto  
plantadas em diferentes densidades / Ian Pereira Sartório. – 2014  
136 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientadores: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:  
Curitiba, 26/02/2014.

Área de concentração: Manejo Florestal

1. Produtividade florestal. 2. Eucalipto. 3. Biomassa vegetal. 4. Clonagem. 5.  
Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Silva, Dimas Agostinho da. III. Universidade  
Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.64

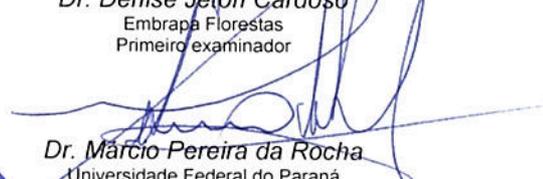


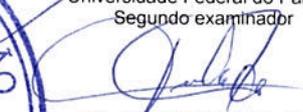
Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da  
Madeira  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

**PARECER**  
Defesa nº. 1026

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Ian Pereira Sartório* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**AVALIAÇÃO E MODELAGEM DO CRESCIMENTO DE FLORESTAS ENERGÉTICAS DE EUCALIPTO PLANTADAS EM DIFERENTES DENSIDADES**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.

  
Dr. Denise Jaton Cardoso  
Embrapa Florestas  
Primeiro examinador

  
Dr. Márcio Pereira da Rocha  
Universidade Federal do Paraná  
Segundo examinador

  
Dr. Julio Eduardo Arce  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 26 de fevereiro de 2014.

  
Antonio Carlos Batista  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Aos meus pais, dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Julio Eduardo Arce, pela oportunidade, confiança e orientação.

Ao Prof. Dimas Agostinho da Silva, pela co-orientação e colaboração.

À empresa Fibria Celulose S/A, por disponibilizar os dados para a realização deste estudo, em especial ao Eduardo Nogueira Campinhos, pela atenção e apoio prestados.

Aos amigos e familiares que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho, seja pelo suporte científico ou pelo carinho e atenção dispensados.

À Deus, por tudo o que é possível agradecer.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento e a produção de clones do gênero *Eucalyptus*, plantados em diferentes espaçamentos, com foco na produção de volume e biomassa para geração de energia. O experimento avaliado pertence à empresa Fibria, foi implantado em dezembro de 2010 e está localizado no município de Três Lagoas, Mato Grosso do Sul. Foram utilizados quatro clones de eucalipto, plantados em quatro espaçamentos (1,5, 3,0, 6,0 e 9,0 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>). Foram medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura de todas as árvores úteis aos 6, 12, 18, 24 e 30 meses de idade. Neste mesmo intervalo, foram derrubadas três árvores de diâmetro médio por tratamento, sendo realizada a sua cubagem, a quantificação da biomassa aérea (tronco, galhos, casca e folhas) e a determinação das propriedades: densidade básica, poder calorífico superior e teor de cinzas, por componente. Avaliou-se o efeito do espaçamento sobre o crescimento individual das árvores e suas propriedades, além do efeito sobre o crescimento e estrutura do povoamento como um todo e sobre sua produção potencial de energia. Foram testados modelos para estimativa do volume e matéria seca individual e modelos globais para estimativa e projeção destas variáveis por hectare. Testou-se também um modelo de densidade e diâmetro para identificar o limite de estoque suportado pelos tratamentos. As idades de rotação ótima foram identificadas para cada clone e espaçamento, com base na máxima produtividade biológica e na máxima densidade suportada. Os resultados observados revelaram um maior crescimento individual nos espaçamentos mais amplos, com árvores com maiores valores de DAP, altura, volume e matéria seca total. A produção em volume por hectare foi diretamente proporcional à densidade do povoamento. Os resultados da produção em matéria seca total por hectare aos 30 meses de idade foram diferentes dos observados para o volume, com produção menor no espaçamento mais denso (1,5 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) e praticamente igual nos demais espaçamentos (3, 6 e 9 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>). Para os clones avaliados, o espaçamento de plantio não teve influência sobre o poder calorífico e teor de cinzas da madeira e galhos. A energia potencial por hectare esteve intimamente relacionada com a produção de biomassa, sendo tão grande quanto a produção de matéria seca nesta mesma área, independentemente das propriedades físicas e energéticas das árvores. A idade de rotação ótima deve estar compreendida entre os 30 e 42 meses para o espaçamento 3x0,5m, entre os 36 e 48 meses para o espaçamento 3x1m e entre os 42 e 54 meses para os espaçamentos 3x2 e 3x3m. Nestas condições, o espaçamento 3x2m foi o que gerou a maior produção de matéria seca total por hectare, considerando sucessivas rotações.

Palavras chave: Eucalipto, Espaçamento, Biomassa, Qualidade da madeira, Energia.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the growth and yield of Eucalyptus's clones, planted at different spacings, focusing on volume and biomass production for power generation. The assessed experiment belongs to Fibria. It was implanted in December 2010 and is located in Três Lagoas, Mato Grosso do Sul. Four clones of eucalyptus were used, planted in four different spacings (1,5, 3,0, 6,0 e 9,0 m<sup>2</sup> plant<sup>-1</sup>). The diameter at breast height (DBH) and height of all the trees of the subplots were measured at the ages of 6, 12, 18, 24 and 30 months. In the same ages, three trees of average diameter, were felled by treatment, having its volume scaled and aboveground biomass quantified (stem, branches, bark and leaves). In addition, samples of the felled trees were collected for the analysis of basic density, calorific value and ash content, per component. The effect of spacing on individual tree's growth and in their physical properties were evaluated, as well as its effect on the growth and structure of tree stands and on its potential for energy production. Some models were tested to estimate the individual volume and dry matter. Whole stand models were also tested to estimate and predict the growth per hectare. A density and diameter model used to identify the maximum stock supported by the tree stands. The optimal rotation ages were identified for each clone and spacing, based on the maximum biological productivity and maximum supported density. The results revealed a higher individual growth in the wider spacings, with trees with higher DBH, height, volume and total dry matter. The volume production per hectare was directly proportional to the density of population. The results of the total dry matter production per hectare at the age of 30 months were different from those observed for the volume, with lower production in the denser spacing (1,5 m<sup>2</sup> plant<sup>-1</sup>) and almost equal production in all other spacings (3, 6 and 9 m<sup>2</sup> plant<sup>-1</sup>). For the evaluated clones, the planting spacing had no influence on the calorific value and ash content of wood and branches. The potential energy per hectare was closely related to biomass production, being as large as the production of dry matter in this same area, regardless to tree's properties. The optimal rotation age should be between 30 and 42 months for the spacing 3x0,5m, between 36 and 48 months for the spacing 3x1m and between 42 and 54 months for the spacings 3x2 and 3x3m. In those circumstances, spacing 3x2m was the one that generated the highest total dry matter per hectare, considering successive rotations.

Keywords: Eucalyptus, Spacing, Biomass, Wood Quality, Energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 3.1 – CURVAS DE PRODUÇÃO, INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA).....	39
FIGURA 3.2 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE ÁRVORES POR ACRE E O DIÂMETRO MÉDIO QUADRÁTICO. ....	47
FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE TRÊS LAGOAS, MS. ....	49
GRÁFICO 4.1 – PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO MUNICÍPIO DE TRÊS LAGOAS, MS. ....	50
FIGURA 4.2 – CROQUI DA PARCELA E SUBPARCELA COM BORDADURA DUPLA.....	52
GRÁFICO 5.1 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x0,5m. ....	67
GRÁFICO 5.2 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x1m. ....	68
GRÁFICO 5.3 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x2m. ....	68
GRÁFICO 5.4 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x3m. ....	69
GRÁFICO 5.5 – DIAGRAMA DE CAIXA ( <i>BOXPLOT</i> ) PARA DADOS DE DAP NOS QUATRO ESPAÇAMENTOS TESTADOS.....	77
GRÁFICO 5.6 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR ESPAÇAMENTO E IDADE DOS CLONES 1 E 2. ....	79
GRÁFICO 5.7 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR ESPAÇAMENTO E IDADE DOS CLONES 3 E 4. ....	80
GRÁFICO 5.8 – DISPERSÃO DA ALTURA SOBRE O DAP EM DIFERENTES IDADES.....	83
GRÁFICO 5.9 – DISPERSÃO DA ALTURA SOBRE O DAP POR ESPAÇAMENTO EM DIFERENTES IDADES.....	84
GRÁFICO 5.10 – DISPERSÃO DA ALTURA SOBRE O DAP POR CLONE EM DIFERENTES IDADES. ....	84
GRÁFICO 5.11 – CRESCIMENTO ACUMULADO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) DAS VARIÁVEIS DAP, ALTURA E ÁREA BASAL (G).....	85
GRÁFICO 5.12 – PRODUÇÃO POR CLONE E ESPAÇAMENTO DAS VARIÁVEIS DAP, ALTURA E ÁREA BASAL AOS 30 MESES.....	86
GRÁFICO 5.13 – CRESCIMENTO ACUMULADO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) DAS VARIÁVEIS VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL (MST).....	87

GRÁFICO 5.14 – PRODUÇÃO EM VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL (MST) POR CLONE E ESPAÇAMENTO AOS 30 MESES.....	88
GRÁFICO 5.15 – EVOLUÇÃO DA TAXA DE MORTALIDADE POR CLONE E ESPAÇAMENTO.....	88
GRÁFICO 5.16 – DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA AÉREA EM FUNÇÃO DA IDADE PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	90
GRÁFICO 5.17 – COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA PARA CADA ESPAÇAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE.....	93
GRÁFICO 5.18 – COMPORTAMENTO DA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA MÉDIA DOS CLONES EM CADA ESPAÇAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE.....	98
GRÁFICO 5.19 – COMPORTAMENTO DA ENERGIA POTENCIAL MÉDIA DOS CLONES EM CADA ESPAÇAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE.....	98
GRÁFICO 5.20 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DO DAP NA ESTIMATIVA DO VOLUME PARA CADA ESPAÇAMENTO E IDADE.....	103
GRÁFICO 5.22 – VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DO DAP PARA CADA IDADE.....	105
GRÁFICO 5.23 – MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL ESTIMADA EM FUNÇÃO DO DAP PARA CADA IDADE.....	106
GRÁFICO 5.24 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DA ÁREA BASAL (G) PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	108
GRÁFICO 5.25 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DO VOLUME POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	109
GRÁFICO 5.26 – VOLUME OBSERVADO E ESTIMADO PARA CADA IDADE E ESPAÇAMENTO.....	110
GRÁFICO 5.27 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	111
GRÁFICO 5.28 – CRESCIMENTO ACUMULADO DAS VARIÁVEIS ÁREA BASAL, VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	113
GRÁFICO 5.29 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) EM ÁREA BASAL PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	115
GRÁFICO 5.30 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) EM VOLUME POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	116
GRÁFICO 5.31 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) EM MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.....	117
GRÁFICO 5.32 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E O DIÂMETRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA CADA ESPAÇAMENTO E IDADE.....	120

GRÁFICO 5.33 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE.....	121
GRÁFICO 5.34 – CURVAS DE MÁXIMA DENSIDADE EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA CADA ESPAÇAMENTO. ....	121

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – DESCRIÇÃO DOS 16 TRATAMENTOS DO FATORIAL 4X4 (4 CLONES E 4 ESPAÇAMENTOS).....	51
TABELA 4.2 – VARIÁVEIS DE INTERESSE ANALISADAS.....	55
TABELA 4.3 – VARIÁVEIS DE BIOMASSA E ENERGIA AVALIADAS.....	59
TABELA 4.4 – MODELOS TRADICIONAIS APLICADOS.....	61
TABELA 5.1 – NÚMERO DE INDIVÍDUOS CUBADOS E INDIVÍDUOS COM DAP DENTRO DO INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA PARA CADA ESPAÇAMENTO, CLONE E IDADE.....	66
TABELA 5.2 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DAS SUBPARCELAS AOS 12 MESES.....	70
TABELA 5.3 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 12 MESES PARA VARIÁVEIS DAP, ALTURA, ÁREA BASAL E SOBREVIVÊNCIA.....	70
TABELA 5.4 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DAS SUBPARCELAS AOS 30 MESES.....	70
TABELA 5.5 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEIS DAP E ALTURA.....	71
TABELA 5.6 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEIS ÁREA BASAL E SOBREVIVÊNCIA.....	72
TABELA 5.7 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DE CUBAGEM E BIOMASSA AOS 12 MESES.....	73
TABELA 5.8 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 12 MESES PARA VARIÁVEIS VOLUME (COM CASCA E SEM CASCA) E MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL.....	73
TABELA 5.9 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DE CUBAGEM E BIOMASSA AOS 30 MESES.....	74
TABELA 5.10 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEIS LARGURA DA COPA E VOLUME (COM CASCA E SEM CASCA).....	74
TABELA 5.11 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEL MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL.....	75
TABELA 5.12 – NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE EM CADA CLASSE DE DIÂMETRO, ESPAÇAMENTO E IDADE.....	81
TABELA 5.13 – VALORES MÉDIOS DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR ESPAÇAMENTO E IDADE.....	82
TABELA 5.14 – PRODUÇÃO POTENCIAL DE MATÉRIA SECA DE CADA COMPONENTE E TOTAL AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE.....	91

TABELA 5.15 – RESULTADOS DA ANOVA PARA PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA.....	92
TABELA 5.16 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA POR ESPAÇAMENTO E IDADE.....	93
TABELA 5.17 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE. ....	94
TABELA 5.18 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DOS GALHOS AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE. ....	95
TABELA 5.19 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DAS FOLHAS E CASCA AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE. ....	96
TABELA 5.20 – RESULTADOS DA ANOVA PARA MATÉRIA SECA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL. ....	97
TABELA 5.21 – BIOMASSA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL POR ESPAÇAMENTO E IDADE.....	98
TABELA 5.22 – VALORES DE F (ANOVA) PARA BIOMASSA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL AOS 30 MESES. ....	99
TABELA 5.23 – BIOMASSA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE E CLASSIFICAÇÃO DE MÉDIAS SEGUNDO TESTE DE TUKEY. ....	100
TABELA 5.24 – MODELOS SELECIONADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL.....	102
TABELA 5.25 – MODELOS SELECIONADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL. ....	104
TABELA 5.26 – RESULTADOS DA ANOVA PARA VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE AOS 30 MESES DE IDADE. ....	106
TABELA 5.27 – VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL MÉDIOS ESTIMADOS PELOS MODELOS SELECIONADOS. ....	107
TABELA 5.28 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA ÁREA BASAL.....	108
TABELA 5.29 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME POR HECTARE.....	109
TABELA 5.30 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE. ....	111
TABELA 5.31 – VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL MÉDIOS ESTIMADOS PELO MODELO DE CLUTTER.....	112
TABELA 5.32 – PRODUÇÃO SOMADA DE MATÉRIA SECA TOTAL EM TONELADAS POR HECTARE PARA DIFERENTES IDADES DE ROTAÇÃO.....	118
TABELA 5.33 – PRODUÇÃO SOMADA DE MATÉRIA SECA TOTAL EM TONELADAS POR HECTARE PARA CADA CLONE E ESPAÇAMENTO. ....	119
TABELA 5.34 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DO MODELO DE TANG. ....	120

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
2 OBJETIVOS .....	17
2.1 OBJETIVO GERAL .....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
3.1 BIOMASSA E ENERGIA .....	18
3.1.1 Cenário atual .....	18
3.1.2 Instrumentos e programas políticos .....	19
3.1.2.1 Rio 92, Protocolo de Quioto e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo .....	20
3.1.3 Biomassa na geração de energia .....	22
3.2 EUCALIPTO E FLORESTAS ENERGÉTICAS .....	23
3.2.1 Histórico .....	23
3.2.2 Florestas energéticas .....	26
3.2.3 Espaçamento .....	27
3.2.3.1 Efeitos do espaçamento .....	28
3.2.4 Biomassa da parte aérea .....	32
3.2.4.1 Densidade .....	33
3.2.4.2 Poder Calorífico .....	35
3.2.4.3 Teor de minerais .....	36
3.2.4.4 Umidade .....	37
3.2.4.5 Distribuição da biomassa .....	38
3.3 AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	38
3.3.1 Modelos de crescimento .....	41
3.3.2 Autodesbaste .....	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	49
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO .....	49
4.1.1 Localização .....	49
4.1.2 Clima .....	49
4.1.3 Solo .....	50
4.2 INSTALAÇÃO E MEDIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	51
4.2.1 Medição e cálculo das variáveis de interesse .....	52
4.3 AVALIAÇÕES .....	54
4.3.1 Comparação entre diâmetros .....	54
4.3.2 Análise estatística .....	55

4.3.3 Análise gráfica .....	55
4.3.3.1 Diagrama de caixa ( <i>Boxplot</i> ) .....	56
4.3.3.2 Distribuição diamétrica .....	57
4.3.3.3 Relação hipsométrica .....	57
4.3.3.4 Crescimento e Produção .....	58
4.3.4 Biomassa da parte aérea .....	58
4.3.5 Modelos de crescimento – Volume e Biomassa.....	59
4.3.5.1 Modelos tradicionais para estimativas individuais .....	61
4.3.5.2 Modelagem global .....	62
4.3.6 Crescimento e produção .....	63
4.3.7 Limites de estoque .....	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE DIÂMETROS .....	66
5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	69
5.2.1 Dados das subparcelas .....	69
5.2.2 Dados de cubagem e biomassa .....	72
5.2.3 Discussão dos resultados.....	76
5.3 ANÁLISE GRÁFICA .....	76
5.3.1 Diagrama de caixa ( <i>Boxplot</i> ) .....	76
5.3.2 Distribuição diamétrica .....	78
5.3.3 Relação hipsométrica .....	82
5.3.4 Crescimento e Produção .....	85
5.3.4.1 Mortalidade.....	88
5.3.5 Discussão dos resultados.....	89
5.4 BIOMASSA DA PARTE AÉREA.....	90
5.4.1 Discussão dos resultados.....	101
5.5 MODELOS DE CRESCIMENTO .....	102
5.5.1 Modelos tradicionais para estimativas individuais .....	102
5.5.2 Modelagem global .....	108
5.6 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO .....	113
5.6.1 Discussão dos resultados.....	119
5.7 LIMITES DE ESTOQUE .....	120
5.7.1 Discussão dos resultados.....	122
6 CONCLUSÕES .....	123
REFERÊNCIAS.....	125
ANEXO.....	136

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia tem se mostrado uma tendência global. Motivado pela preocupação sobre as mudanças climáticas e também pelo esgotamento dos recursos naturais, o mercado mundial tem despertado interesse no desenvolvimento e adoção de fontes alternativas e renováveis de energia.

Além dos fatores relacionados ao meio ambiente, questões econômicas, como o aumento do preço do petróleo e o fato de sua produção estar concentrada em poucos países, levaram diversos países a se preocupar com sua segurança energética. Comunidades ao redor do mundo estabeleceram metas ambiciosas para a redução das emissões de gases do efeito estufa e para a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis na sua matriz energética.

A energia gerada através da biomassa é a de maior destaque entre as fontes renováveis, sendo ela a mais utilizada atualmente. A demanda por biomassa destinada à produção de energia, em especial a biomassa florestal, tem aumentado consideravelmente com o passar dos anos. No entanto, a sua oferta não cresce no mesmo ritmo, evidenciando um déficit deste produto num cenário não muito distante.

Esta crescente demanda tem estimulado ainda mais a busca de florestas mais produtivas, com maiores produções em menores intervalos de tempo, e de melhor qualidade. Grande parte das pesquisas nesse sentido vem sendo realizadas com foco no melhoramento genético e nas práticas silviculturais, tais como adubação, irrigação, tratamentos culturais e espaçamento de plantio.

Em função de sua grande plasticidade ambiental, altos índices de produtividade e características energéticas (densidade da madeira e poder calorífico), o gênero *Eucalyptus* tem sido o mais utilizado para a implantação de florestas com fins energéticos (COUTO; MÜLLER, 2008). Este gênero conta com diversas espécies, cada uma com suas propriedades e inúmeras opções de uso. Desta forma, a escolha da espécie correta com base em seu uso final é de grande importância.

A técnica de adensamento dos plantios com eucalipto, fundamentada na necessidade da redução do ciclo da cultura e no aumento de sua produtividade, está sendo difundida devido aos resultados de pesquisas e avaliações de campo realizadas por diversas instituições, pesquisadores e empresas (GUERRA *et al.*, 2012). No entanto, o conhecimento sobre as possíveis implicações ecológicas e

silviculturais da densidade de plantio assume uma importância fundamental no sentido de se evitar exageros na adoção dos espaçamentos (BALLONI; SIMÕES, 1980).

Nesse contexto, este estudo teve a finalidade de avaliar os efeitos da técnica de adensamento do plantio, em diferentes materiais genéticos de eucalipto, visando a produção de biomassa para geração de energia.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o crescimento e a produção de plantios de quatro clones do gênero *Eucalyptus*, estabelecidos em diferentes densidades, com enfoque na produção de volume, biomassa e energia.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar e comparar a produção de volume e biomassa de eucalipto em diferentes espaçamentos e clones comerciais (produtividade e qualidade), considerando variáveis individuais e variáveis por unidade de área;
- Testar modelos de crescimento e produção concebidos para outros usos e avaliar sua precisão de ajuste para dados de florestas energéticas, de alta densidade;
- Identificar os espaçamentos que resultem na maior produtividade florestal para os quatro materiais genéticos, ao longo do período avaliado;
- Identificar a rotação ótima para cada espaçamento em função da produção em volume, biomassa e energia por unidade de área;
- Identificar limites de estoque, com base na lei do autodesbaste.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 BIOMASSA E ENERGIA

#### 3.1.1 Cenário atual

A competitividade econômica dos países e a qualidade de vida de sua população são fortemente influenciadas pela energia. Fatores como mercados em expansão, aumento populacional, alterações climáticas e outras preocupações ambientais aumentarão a demanda por energia, fazendo com que os países busquem novas tecnologias de produção e maneiras de economizar e diversificar suas fontes energéticas, de modo a garantir uma energia segura, sustentável e a preços acessíveis.

A utilização de energias alternativas renováveis, em especial o uso da biomassa como fonte energética, tanto nos países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento, vem crescendo continuamente, incentivado principalmente pelas pressões ambientais, no sentido de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar o uso de fontes renováveis (MUELLER, 2005; ASSIS, 2012).

A motivação para essa mudança de postura também é decorrente da necessidade de redução do uso de derivados de petróleo e, conseqüentemente, da dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo (CORTEZ *et al.*, 2008).

Projeções realizadas para o setor energético brasileiro apontam que o consumo de energia crescerá a taxas superiores às das últimas décadas e que a expansão da oferta energética poderá superar o dobro da atual capacidade instalada em todos os segmentos (TOLMASQUIM *et al.*, 2007).

Segundo o Panorama da Energia Mundial 2013, elaborado pela Administração de Informação de Energia dos Estados Unidos (EIA, na sigla em inglês), enquanto nos países emergentes o consumo de energia deve expandir 90% até 2040, nas nações industrializadas esse aumento deverá ser de apenas 17%. Ainda de acordo com o documento, Brasil e Estados Unidos serão responsáveis por mais da metade da oferta de biocombustíveis até 2040.

A energia gerada a partir da biomassa no Brasil até o mês de novembro de 2013 atingiu o total de 11.250 MW de potência instalada, por meio de 474 usinas em operação, marca que supera a capacidade a ser estabelecida na Usina Belo Monte até 2019, estimada em 11.233 MW (UNICA, 2013).

Segundo o Anuário Estatístico de 2013 da Associação Brasileira de Florestas Plantadas (ABRAF), atualmente, a biomassa de base florestal representa 15,8% da geração de energia elétrica a partir de biomassa, enquanto outras biomassas como o biogás, a casca de arroz, o capim elefante e o óleo de palma, representam apenas 1,8%.

### **3.1.2 Instrumentos e programas políticos**

No Brasil, o Plano Nacional de Energia (PNE), o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) e o Decreto Nº 7.390, de 2010, que regulamenta a Política Nacional de Mudança do Clima, expressam o compromisso brasileiro para o incremento da eficiência energética no país. Portanto, o norteamento sobre as políticas para incremento da eficiência energética para o Brasil existe, bem como um mercado e fornecedores habilitados (AGUIAR, 2014).

Dentre as ações do governo brasileiro direcionadas à diversificação da matriz energética nacional, destaca-se projeto de lei 3.529/2012, que instituirá a política nacional de geração de energia elétrica a partir da biomassa, estabelecendo a obrigatoriedade da contratação da bioenergia na composição da geração elétrica nacional (ABRAF, 2013).

Com o mesmo intuito, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), conforme descrito no decreto nº 5.025, de 2004, instituído com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas no Sistema Elétrico Interligado Nacional (BRASIL, 2004).

A questão energética é um dos maiores desafios que a Europa enfrenta atualmente (COMISSÃO EUROPEIA, 2011). A União Europeia (UE), a segunda maior economia mundial, consome um quinto da energia produzida no mundo, mas possui poucas reservas energéticas (COMISSÃO EUROPEIA, 2013). Mais de metade da energia que a UE consome é importada, o que afeta intensamente a economia dos

países e ressalta a urgência da Europa em buscar meios de consumir menos energia e diversificar suas fontes energéticas.

A UE adotou, em dezembro de 2008, um conjunto de medidas cujo objetivo é reduzir o seu contributo no aquecimento climático e garantir o aprovisionamento em energia (UNIÃO EUROPEIA, 2013), um plano estratégico para tecnologias energéticas hipocarbônicas. Algumas iniciativas incidem sobre a produção e as fontes de energia, designadamente os biocombustíveis, a energia eólica, a energia solar e a energia nuclear, bem como sobre as pilhas de combustível e a utilização do hidrogênio; outras dizem respeito à melhor gestão da energia nas “cidades inteligentes”, à captação e ao armazenamento subterrâneo de CO<sub>2</sub> e às redes elétricas do futuro (COMISSÃO EUROPEIA, 2013).

No âmbito das negociações internacionais sobre o clima, a Europa comprometeu-se a reduzir em 20% as emissões de gases com efeito de estufa até 2020, em relação aos níveis de 1990, e a aumentar essa percentagem para 85%, ou mesmo 95%, até 2050. A maior parte do esforço deverá caber ao setor energético, responsável por 80% dessas emissões na União Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2013).

### **3.1.2.1 Rio 92, Protocolo de Quioto e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**

A crescente emissão de gases de efeito estufa (GEE) intensificam o aumento da temperatura na Terra e este fato vem despertando interesse e preocupação das autoridades e da população mundial, formando um consenso internacional em relação ao aquecimento global.

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), adotada durante a Conferência Rio 92, foi um passo importante dado pela comunidade internacional para atingir o objetivo de alcançar a estabilização das concentrações de GEE na atmosfera em nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático (MOREIRA; GIOMETTI, 2008).

Neste contexto, em dezembro de 1997, em Quioto, Japão, foi adotado um Protocolo como proposta concreta de início do processo de estabilização das emissões e gases geradores da intensificação do efeito estufa (ASSIS, 2012). O Protocolo de Quioto definiu metas de redução de emissões para os países desenvolvidos, responsáveis históricos pela mudança atual do clima (BRASIL, 2013).

Este documento estabeleceu um acordo de redução dos GEE, por parte dos países desenvolvidos (países do Anexo-I) em 5,2%, de 2008 a 2012, em relação aos níveis observados em 1990. Para tanto, existem algumas alternativas para auxiliá-los ao cumprimento de suas metas, chamadas de mecanismos de flexibilização (BIODIESEL, 2013).

Um dos mecanismos propostos é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o único que permite a participação de países em desenvolvimento em cooperação com países desenvolvidos (MOREIRA; GIOMETTI, 2008). O objetivo final da redução das emissões pode ser atingido, assim, por meio da implementação de atividades de projetos nos países em desenvolvimento que resultem na redução das emissões de GEE ou no aumento da remoção de CO<sub>2</sub>, mediante investimentos em tecnologias mais eficientes, substituição de fontes de energia fósseis por renováveis, racionalização do uso da energia, florestamento e reflorestamento, entre outros (LOPES, 2002). Trata-se do comércio de créditos de carbono baseado em projetos de sequestro ou mitigação (BIODIESEL, 2013).

O mecanismo consiste na negociação no mercado mundial de cada tonelada do CO<sub>2</sub> que deixa de ser emitido nos países desenvolvidos ou retirado da atmosfera por projetos de absorção do carbono nos países em desenvolvimento, obtendo-se assim Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) (UNFCCC<sup>1</sup>, 1997 *apud* ASSIS, 2012), em que cada RCE corresponde a redução de 1 tonelada de CO<sub>2</sub> (CDM WATCH, 2010). Essa proposta, além de auxiliar os países do Anexo I (países desenvolvidos) a atingir os compromissos de redução de emissões, contribui para o desenvolvimento sustentável, investimento e inovação tecnológica nos países em desenvolvimento (ASSIS, 2012).

Desta maneira, o MDL se constitui em uma grande oportunidade para que o Brasil promova o desenvolvimento sustentável, melhore sua capacidade tecnológica e financeira, acesse novos mercados e atividades de negócio, obtendo recursos para o desenvolvimento e implementação de projetos que utilizem fontes renováveis de energia.

Desde a Conferência Rio 92, o Brasil vem exercendo papel de destaque nas negociações internacionais relacionadas ao meio ambiente, o que ficou ainda mais evidente durante as negociações para a adoção do Protocolo de Quioto (MOREIRA;

---

<sup>1</sup> UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Bonn, Germany, jul. 1997.

GIOMETTI, 2008). O Brasil é o terceiro país com o maior número de projetos de MDL ao lado da Índia e da China (Valor Econômico, 2011). Desde a consolidação dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) no final da década de 1990, a quantificação de carbono em áreas florestadas brasileiras vem se tornando cada vez mais comum (BRUZINGA *et al.*, 2012).

### **3.1.3 Biomassa na geração de energia**

Segundo Müller (2005), a produção de eletricidade a partir de biomassa, no Brasil, se dá essencialmente pelo aproveitamento de resíduos (de cultivo ou de processos industriais). Ainda segundo o autor, esta forma de utilização apresenta uma série de limitações, tais como a heterogeneidade do material, grande dispersão e baixa densidade espacial, além do seu uso acarretar na exportação de nutrientes que retornariam ao solo. Ainda, esta forma de biomassa é um subproduto de outras atividades, estando sua oferta atrelada ao desempenho de outra atividade geradora de resíduos.

Nesse contexto, a silvicultura visando a produção de biomassa, especificamente para a geração elétrica, ganha destaque, uma vez que apresenta potencial para solucionar grande parte dos problemas citados (MÜLLER, 2005).

O uso da madeira para produção de energia também apresenta menores problemas de poluição, quando comparada aos combustíveis fósseis, tendo em vista que ela possui um baixo teor de enxofre (CUNHA *et al.*, 1989). A utilização de plantações florestais visando à produção de biomassa para produção de energia contribui para uma perspectiva ambiental mais sustentável, pois se tem um aproveitamento da madeira e conseqüentemente, o retorno dos resíduos (casca, galhos, folhas) para o solo (ROCHA, 2011). Ainda, o setor florestal desponta como uma das alternativas viáveis para mitigar o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, via fixação do carbono pelas plantas arbóreas, principalmente (GATTO *et al.*, 2011).

Para obtenção de energia a partir da madeira, pode-se optar pelo seu uso como fonte primária ou secundária. O uso da madeira como fonte primária de energia nada mais é, do que a sua queima direta, a qual consiste na sua transformação térmica. É utilizada para cozinhar e aquecer ambientes, mas é no setor industrial que

está sua maior importância, onde é utilizada de forma direta em fornos ou de forma indireta, para geração de vapor em caldeiras (ROCHA; KLITZKE, 1998).

A obtenção de energia secundária da madeira é bem conhecida e utilizada, em virtude de sua versatilidade, onde é possível se obter combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Tais combustíveis são obtidos através da pirólise, da hidrólise, gaseificação e processos de transesterificação, onde se obtém carvão vegetal, etanol, metanol, gases não condensáveis e óleos combustíveis, entre outros (ROCHA; KLITZKE, 1998).

Considerando o potencial representado pelo eucalipto como produtor de madeira de qualidade, há condições ambientais e conhecimentos silviculturais suficientes para dar ao País vantagem comparativa na produção de matéria-prima oriunda de florestas renováveis (BARCELLOS *et al.*, 2005).

## **3.2 EUCALIPTO E FLORESTAS ENERGÉTICAS**

### **3.2.1 Histórico**

Plantações florestais têm sido estabelecidas desde há muito tempo na América do Norte e na Europa, com o propósito de fornecer madeira para fins industriais (LIMA, 1996).

Entre as florestas plantadas, os povoamentos de eucalipto recebem destaque por ser o gênero *Eucalyptus* o mais implantado e estudado no Brasil (OLIVEIRA, 2007). De acordo com o Anuário Estatístico de 2013 da Associação Brasileira de Florestas Plantadas - ABRAF, a área plantada com o gênero totalizou 5.102.030 hectares em 2012, sendo que 53% estavam concentrados na região sudeste.

*Eucalyptus* (“verdadeira cobertura”, em grego) é o gênero predominante entre as árvores da Austrália, onde existem mais de 600 espécies, grande número de variedades e muitos híbridos (FUJIHARA *et al.*, 2009). Segundo Bertola (2004), o seu cultivo tem sido amplamente utilizado em vários países em razão da grande diversidade de espécies e de usos, elevada taxa de crescimento, capacidade de regenerar-se por brotação a partir da cepa e ser manejado em várias rotações.

O plantio do eucalipto em escala comercial no Brasil data da primeira década do século XX. Segundo diversos autores, como Moro e Garcia (2000), Leão (2000), Macedo e Machado (2003), Couto e Müller (2008) e Quéno (2009), foi o agrônomo

Edmundo Navarro de Andrade que iniciou no Brasil em 1904 o plantio intensivo desse gênero.

Inicialmente, o eucalipto foi introduzido como monocultura destinada a suprir a demanda de lenha para combustíveis das locomotivas e dormentes para trilhos da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Além disso, era utilizado para a produção de mourões de cercas e postes margeando a ferrovia, fornecendo ainda o madeiramento para a construção de estações e vilas (MORA; GARCIA, 2000).

Mais adiante, na década de 1940, a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira iniciou um programa pioneiro de reflorestamento baseado no gênero *Eucalyptus*, com o objetivo de utilizar a madeira produzida nestes povoamentos para suprir a demanda de carvão vegetal de sua usina (MAGALHÃES, 1993; MÜLLER, 2005; CALAIS, 2009). De acordo com Fujihara *et al.* (2009), à época, outro cultivo significativo de eucaliptos ocorreu no Espírito Santo, com a instalação da antiga Companhia de Ferro e Aço de Vitória, mais tarde incorporada pela Belgo-Mineira. Essas florestas serviriam depois como ponto de partida para as plantações da empresa Aracruz Celulose.

Durante os anos 1950, os eucaliptais também forneceram matéria-prima para a indústria paulista de chapas de fibra de madeira, mas foi com a fabricação de celulose que o gênero ganhou maior destaque. A iniciativa foi da família Feffer, proprietária da uma fábrica de papel, em Suzano, no estado de São Paulo (FUJIHARA *et al.*, 2009).

O Programa de Incentivos Fiscais, iniciado em 1967 e que permitiu que parte do imposto devido pelas empresas fosse aplicado em projetos de florestamentos, promoveu uma grande expansão no setor florestal. Neste período, a maioria dos esforços foi direcionada no sentido de aumentar a produtividade dos povoamentos (COUTO; MÜLLER; TSUKAMOTO, 2002; MÜLLER, 2005).

Conforme citado por Leão (2000), segundo informações do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF - órgão federal criado em 1967 e encarregado de gerenciar o setor florestal na época), em decorrência da legislação, o crescimento da área de reflorestamento no país situou-se na faixa de 100 a 250 mil hectares anuais, no período de 1968 a 1973; entre 1974 e 1982 elevou-se para 450 mil hectares anuais.

Dentre os setores mais beneficiados, estavam o siderúrgico e o de papel e celulose, em plena expansão. Essas indústrias eram obrigadas, por força da lei, a manter áreas próprias para a produção de matéria-prima (FUJIHARA *et al.*, 2009).

A adoção de técnicas silviculturais mais intensivas (preparo do solo, fertilização adequada, combate a pragas e doenças, etc.) aliada à reintrodução de novos materiais genéticos resultaram em ganhos consideráveis de produção. Outra estratégia que alcançou ganhos consideráveis foi a propagação clonal, maximizando os ganhos em uma única geração, mantendo as características favoráveis e evitando a variabilidade encontrada em árvores obtidas a partir de sementes (HIGASHI; SILVEIRA; GONÇALVES, 2000).

No Brasil, a produção massal de mudas clonais começou na região litorânea do Espírito Santo, em 1979, e se estendeu a outras regiões do país. A técnica de propagação vegetativa por estaquia foi introduzida no Brasil pelos engenheiros Edgard Campinhos e Yara Ikemori. Desde então, o processo da clonagem de eucalipto evoluiu muito (CAMPINHOS; IKEMORI, 1983; HIGASHI; SILVEIRA; GONÇALVES, 2000; ALFENAS *et al.*, 2004). Atualmente existem materiais genéticos desenvolvidos e selecionados para as mais diversas regiões e finalidades de utilização final da madeira (COUTO; MÜLLER, 2008).

Em dezembro de 1987, os benefícios fiscais foram extintos pelo governo e substituídos por outros, menos atraentes às empresas. Segundo Soresini<sup>2</sup> (1993, citado por Leão, 2000), essa realidade afetou principalmente os cultivos destinados à produção de carvão vegetal e lenha, que em 1989 supriam apenas 20% de suas necessidades por meio de florestas plantadas. A indústria nacional de celulose e papel foi mais feliz: na mesma época, já utilizava na sua produção apenas madeira proveniente de reflorestamento.

Por diversas razões, que vão desde deficiências técnicas na instalação até graves distorções na aplicação dos recursos disponíveis, a produção de muitos projetos de reflorestamento implantados na época dos incentivos fiscais ficou abaixo das expectativas, em termos de quantidade e qualidade, tornando-se um problema com o qual o setor florestal teve de conviver por muito tempo (LEÃO, 2000; FUJIHARA *et al.*, 2009).

Bertola (2004) também afirma que os reflorestamentos estabelecidos nesta época no Brasil não apresentaram os resultados esperados quanto à produtividade.

---

<sup>2</sup> SORESINI, L. Benefícios Sociais e Econômicos da Pesquisa Florestal. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Florestal**, 1, Belo Horizonte, 1993. *Anais*. Belo Horizonte, Sociedade de Investigações Florestais, 1993, p. 300-305.

O mesmo autor atribui este insucesso principalmente à insuficiência de trabalhos científicos que permitissem nortear o estabelecimento dessas florestas com técnicas de manejo adequadas, ao mau planejamento do uso da terra, à escolha inadequada da espécie/procedência e falhas na política, legislação e fiscalização.

Com a consolidação do setor florestal, esta realidade mudou. Segundo Couto e Müller (2008), houve uma grande revolução nas técnicas de implantação, manejo e colheita de florestas plantadas. Com isso foram obtidos ganhos de produtividade e redução de custos. Por outro lado, os impactos ambientais foram minimizados, de forma que hoje os plantios florestais podem ser considerados ambientalmente sustentáveis.

As condições edafoclimáticas, bem como a grande extensão territorial, aliadas à disponibilidade de terras e mão-de-obra, favoreceram o desenvolvimento tecnológico da silvicultura em curto espaço de tempo, proporcionando ao Brasil alcançar um nível de excelência em silvicultura de florestas homogêneas, reconhecido internacionalmente (COUTO; MÜLLER, 2008).

Atualmente, o segmento de papel e celulose concentra 72,5% da área plantada de eucalipto no país, seguido pelos segmentos de siderurgia a carvão vegetal (19,5%), painéis de madeira industrializada (7,3%) e produtores independentes (0,7%) (ABRAF, 2013). Essas estatísticas retratam o processo de formação do setor florestal brasileiro, uma vez que a maior parte dos investimentos para formação de plantios florestais foi consequência do desenvolvimento dos segmentos de papel e celulose, principalmente, e da siderurgia.

### **3.2.2 Florestas energéticas**

O conceito de florestas energéticas foi introduzido na década de 1980, para definir as plantações florestais com grande número de árvores por hectare e, conseqüentemente, de curta rotação, que tinham como finalidade a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo (MAGALHÃES<sup>3</sup>, 1982, *apud* COUTO; MÜLLER, 2008).

As diferenças básicas entre as florestas energéticas e as florestas tradicionais estão no menor ciclo de corte e no menor espaçamento entre as árvores, geralmente

---

<sup>3</sup> MAGALHÃES, J. G. R. "Tecnologia de obtenção da madeira". In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC, 1982.

menor que 2 x 2 m, ou seja, mais de 2.500 árvores por hectare. Além da alta densidade, as florestas energéticas são caracterizadas por árvores de pequeno diâmetro (CANTO, 2009).

Em função de sua grande plasticidade ambiental, altos índices de produtividade e características energéticas (densidade da madeira e poder calorífico), o gênero *Eucalyptus* é o mais utilizado para a implantação de florestas com fins energéticos. O gênero tem sido apontado como uma das melhores opções para a produção de energia devido, principalmente, ao grande número de espécies, o que possibilita uma ampla distribuição ecológica, favorecendo sua introdução em várias regiões com diferentes condições edafoclimáticas (COUTO; MÜLLER, 2008).

O manejo florestal visando a produção de biomassa para energia consiste basicamente na escolha do material genético adequado, no controle da densidade de plantio e da rotação dos plantios subsidiados por critérios econômicos (COUTO; MÜLLER, 2008).

### **3.2.3 Espaçamento**

Um dos pontos principais dentro do planejamento de implantação de uma floresta é a definição do espaçamento de plantio. A escolha do espaçamento adequado tem como objetivo proporcionar para cada indivíduo o espaço suficiente para se obter o crescimento máximo com melhor qualidade e menor custo (BOTELHO, 1998).

Os fatores que são preponderantes na definição do espaçamento entre plantas são o objetivo final da madeira, a capacidade produtiva do local e o sistema de colheita adotado. Essa decisão é complexa, pois envolve a avaliação de aspectos ecológicos, fisiológicos, silviculturais e econômicos (LEITE *et al.*, 2006).

A escolha do espaçamento adequado depende do conhecimento dos fatores ambientais que afetam os processos fisiológicos do crescimento e suas prováveis consequências, associado à avaliação econômica dos custos de implantação, manejo e colheita e às necessidades do mercado. Esta análise permite definir o espaçamento de plantio que pode gerar o maior lucro (BOTELHO, 1998).

Considerando-se a diversidade de comportamento das espécies florestais e as diferentes qualidades de madeira exigidas para cada uso, espera-se que o espaçamento ideal para celulose não seja o mesmo indicado para produção de lenha,

carvão ou madeira para energia. A diferenciação entre espaçamentos também pode ocorrer ao nível de espécies, ou seja, espécies diferentes podem apresentar comportamentos diferentes dentro de um mesmo espaçamento de plantio (BALLONI; SIMÕES, 1980). Os espaçamentos mais utilizados, inclusive para energia, são aqueles que proporcionam uma área útil variando de 3 m<sup>2</sup> a 9 m<sup>2</sup> (COUTO *et al.*, 2002).

A técnica de adensamento dos plantios com eucalipto está sendo difundida devido aos resultados de pesquisas e avaliações de campo realizadas por diversas instituições, pesquisadores e empresas. A tendência de adensamento dos plantios de eucalipto para a produção de biomassa é reforçada pelo fato da necessidade de redução do ciclo da cultura, resultando em ganhos de produtividade, tempo e custo com o manejo florestal (GUERRA *et al.*, 2012).

Todavia, dependendo do espaçamento de plantio e do ritmo de crescimento, os cortes se tornariam necessários em fases muito jovens do crescimento, o que poderia exportar quantidades excessivas de nutrientes do solo, diminuindo sua fertilidade e podendo comprometer o sucesso das rotações futuras, além de produzir madeira de qualidade inferior. Portanto, dependendo da espécie a ser implantada, não seria conveniente a adoção de espaçamentos extremamente apertados para se antecipar sua rotação (BALLONI; SIMÕES, 1980).

Desta forma, o conhecimento sobre as possíveis implicações ecológicas e silviculturais da densidade de plantio assume uma importância fundamental no sentido de se evitar exageros na adoção dos espaçamentos (BALLONI; SIMÕES, 1980).

### **3.2.3.1 Efeitos do espaçamento**

Para a mesma espécie e mesmo sítio, o espaçamento de plantio influencia o número de tratos culturais a serem efetuados, a taxa de crescimento, o volume de madeira produzido, o sortimento da madeira, a taxa de mortalidade e dominância, a idade de estagnação do crescimento, as práticas de implantação, manejo e exploração, a qualidade da madeira, o volume da copa, a frutificação e os custos de produção, dentre outros aspectos (BALLONI; SIMÕES, 1980; BOTELHO, 1998; SILVA, 1999; MORAIS, 2006).

Vários autores, como Mello *et al.* (1982), Rezende *et al.* (1983), Klein e Freitas (1988), Mora (1986), Silva (1990), Gorgulho *et al.* (1991), Lisita *et al.* (1997) e Ferreira *et al.* (1997), ressaltam que, com o tempo, a quantidade de madeira estocada em um

determinado sítio tende a se igualar em diferentes espaçamentos, sendo que nos plantios mais densos ocorre a estagnação do crescimento em plantas mais jovens e, nos plantios com espaçamentos mais amplos, a estagnação do crescimento ocorre em idades mais avançadas (COUTO; MÜLLER, 2008).

Em média, segundo preceitos teóricos silviculturais, o espaçamento tem uma influência maior no desenvolvimento do DAP do que no desenvolvimento em altura das árvores. O aumento do DAP através do aumento do espaçamento entre árvores foi comprovado por centenas de trabalhos experimentais desenvolvidos nas mais diversas regiões do mundo. Entretanto, existe alguma controvérsia com relação aos reflexos do espaçamento sobre o crescimento em altura das árvores. Existem casos onde a altura média aumenta com o espaçamento e outros onde o resultado é o inverso (EVERT<sup>4</sup>, 1971, *apud* BALLONI; SIMÕES, 1980).

Teoricamente, a competição entre plantas em busca de luz é muito mais intensa nos espaçamentos mais reduzidos, em razão da necessidade da árvore ampliar ao máximo a superfície foliar e cobrir sua necessidade de assimilação, estimulando assim o crescimento em altura (SILVA, 1990). Porém, uma diminuição da altura média com o uso de espaçamentos menores foi observada por Balloni e Simões (1980), que ressaltaram a existência de várias controvérsias em relação à influência do espaçamento sobre o crescimento em altura das árvores.

Balloni (1983) explica que a diminuição da altura média das plantas, à medida que diminui o espaçamento, dentro de certos limites, ocorre em razão de haver um número considerável de árvores dominadas (LELES, 2001).

Scolforo (1998b) assume que há um maior crescimento em altura em espaçamentos menores e apresenta este comportamento para *Pinus taeda* sujeito a cinco diferentes espaçamentos, desde seu plantio até os 10 anos de idade. Assis *et al.* (1999) e Berger *et al.* (2002) também relataram este comportamento para as espécies *Eucalyptus urophylla* e *E. saligna*, respectivamente, plantadas em diferentes densidades. Já Moraes (2006), também trabalhando com eucaliptos, até 84 meses de idade, observou resultados contrários, havendo uma resposta positiva do crescimento em altura ao aumento do espaçamento.

Leles *et al.* (2001) constataram que em espaçamentos de 81 a 9 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup> (9x9 e 3x3m), aos 52 meses de idade, não houve diferença significativa na altura

---

<sup>4</sup> EVERT, F. Spacing studies: a review. **Information report. FMR-X**, Ottawa, (37): 1-95, dez. 1971.

média de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita*, porém, a partir do espaçamento 3x2m, a altura diminuiu com o espaçamento de plantio.

Quanto ao crescimento das variáveis por unidade de área, tais como área basal e volume por hectare, espera-se um maior valor destas variáveis num menor espaçamento. No entanto, a média dos diâmetros das plantas serão menores do que de plantas em maiores espaçamentos. Scolforo (1998b) comenta que, neste último caso, a produção total é menor, mas não necessariamente implica na obtenção de menor renda, já que a média aritmética dos diâmetros neste espaçamento é maior, acarretando em maior valor de venda por metro cúbico de madeira para uma mesma espécie, idade, sítio, procedência e tratos florestais. Outro fato significativo comentado pelo autor é que ao aumentar o espaçamento, gasta-se menos com sementes, produção de mudas, plantio, adubação e colheita, dentre outros.

Berger *et al.* (2002), analisando o efeito do espaçamento no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna*, dos três aos dez anos de idade, observou que a produção em volume comercial sem casca por hectare foi menor para os tratamentos que constituíam o maior espaço vital (12 m<sup>2</sup>), sendo que praticamente não diferiu entre os dois menores (6 e 9 m<sup>2</sup>).

Morais (2006), ao estudar a dinâmica de crescimento de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos, até os 84 meses de idade, concluiu que os maiores valores médios de volume por hectare foram observados nos espaçamentos mais adensados (3x2m e 6x2m). De acordo com o mesmo estudo, os valores médios de vol/ha, G/ha, ICA (vol/ha) e IMA (vol/ha) decresceram com o aumento do espaçamento de plantio. Para a produção de biomassa, recomendou espaçamentos com área útil de até 12m<sup>2</sup> por árvore. O mesmo autor cita que Ladeira *et al.* (2001) recomendaram a utilização do espaçamento 3x1,5m, com superior produção de biomassa por hectare para *Eucalyptus pellita* e *E. urophylla*, desde que o uso do produto final não requeira árvores de grandes dimensões.

Oliveira Neto *et al.* (2003), avaliando a produção e a distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* em resposta ao espaçamento, constataram que os maiores valores de biomassa da parte aérea por hectare, aos 32 meses de idade, foram observados nos espaçamentos mais reduzidos (3x2m e 3x3m), quando comparados com os espaçamentos mais amplos (3x4m e 3x5 m).

Diversos trabalhos foram publicados estudando o efeito do espaçamento sobre a produção por hectare em volume e biomassa para espécies de eucalipto. No

entanto, em sua grande maioria, o espaçamento de plantio mais denso avaliado disponibiliza uma área de 6 m<sup>2</sup> por planta, geralmente no arranjo 3x2m.

Balloni e Simões (1980), em seus estudos sobre o espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais, concluíram que como medida de precaução e considerando as limitações ambientais de grande parte da região dos cerrados, bem como as características silviculturais das espécies de *Eucalyptus* disponíveis para plantio naquela época, era preferível evitar o plantio de grandes áreas com florestas de *Eucalyptus* com espaçamentos inferiores a 3 m<sup>2</sup>/planta, até que as pesquisas mostrassem suas reais possibilidades.

No estudo desenvolvido por Müller (2005), ao avaliar um clone de eucalipto estabelecido em diferentes densidades (1,5, 3,0, 4,5, 6,0 e 9,0 m<sup>2</sup> por planta), com distância entre linhas mantida em três metros, aos 24 meses de idade, foi observada relação direta entre o volume e o peso da biomassa seca por hectare e a densidade de plantio, ou seja, nos tratamentos com maiores densidades foram observados os maiores volumes de madeira e peso de biomassa seca por hectare.

Garcia *et al.* (2011) e Machado *et al.* (2012) observaram a mesma tendência, em que o adensamento de plantio ocasiona maior produção por hectare. Entretanto, Machado *et al.* (2012), trabalhando com *Eucalyptus grandis* aos 12 meses de idade em diferentes espaçamentos e arranjos de plantio, ressaltaram que do maior para o menor espaçamento a quantidade de mudas aumentou, em aproximadamente, 2,3 vezes, enquanto a produtividade aumentou 1,5 vezes, evidenciando que o ganho em produtividade não ocorreu em escala proporcional à quantidade de insumos utilizada.

Segundo Leles *et al.* (2001), em seu estudo sobre crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos (3x1, 3x1,5, 3x2, 3x3, 3x4, 3x5, 3x6, 6x4 e 9x9m), aos 52 meses de idade, a produção de biomassa total por hectare foi maior no espaçamento 3x2m para *E. camaldulensis* e, no 3x4m para *E. pellita*. No entanto, a maior produção de madeira por hectare foi obtida no espaçamento 3x2 m, para as duas espécies estudadas, tendo sido observado um contínuo decréscimo com o aumento do espaçamento.

Em grande parte dos estudos relacionados ao espaçamento, a distância entre linhas é fixada em três metros, geralmente devido ao maquinário envolvido nos processos de implantação e colheita, principalmente. No entanto, outros arranjos de

plantio, com diferentes distâncias entrelinhas e entre plantas, podem ocasionar em povoamentos com maior uniformidade e produtividade.

Segundo Binkley *et al.* (2002), a adoção de espaçamentos e arranjos de plantio inadequados pode intensificar a competição intraespecífica, reduzindo a uniformidade de crescimento entre as árvores e aumentando a quantidade de árvores dominadas, as quais possuem menor eficiência de utilização dos recursos do meio, quando comparadas às árvores dominantes.

### **3.2.4 Biomassa da parte aérea**

Na geração de energia, a madeira do gênero *Eucalyptus* tem grande importância nos setores comercial, industrial e residencial. O carvão vegetal, por exemplo, é excelente matéria-prima para a siderurgia brasileira devido ao seu valor como combustível e termorreduzidor, elevado grau de pureza e baixo custo de produção, além de ser um produto renovável e ambientalmente correto quando oriundo de florestas plantadas (FREDERICO, 2009).

Considerando o uso final da madeira, parte-se do princípio de que a madeira deve possuir certas qualidades que atendam a certas características relacionadas ao seu uso final. O eucalipto, por ser uma madeira de elevada versatilidade e elevada produtividade, atende, na maioria dos casos, à necessidade energética do País (BARCELLOS *et al.*, 2005).

Deve-se sempre procurar definir quais itens de qualidade são ou não importantes para se produzir madeira para energia. Antes de avaliar como intervenções silviculturais afetam a qualidade da madeira, é preciso saber quais índices de qualidade (características técnicas da biomassa) são importantes para produção de energia. Dentre elas podem ser citadas: densidade, teor de minerais, poder calorífico, composição química (elementar e imediata) e umidade. Em geral, a madeira para energia, seja ela para produção de carvão ou uso em caldeiras, deve possuir elevada densidade, alto teor de lignina, elevado poder calorífico, baixa umidade (qualidade não da madeira, mas do produto energético) e baixo teor de minerais (BARCELLOS *et al.*, 2005).

A idade de corte e os tratamentos silviculturais aplicados ao povoamento florestal, como por exemplo, o espaçamento do plantio, podem causar alterações nas características da madeira. Desta forma, o espaçamento utilizado em um povoamento

florestal deve ser estabelecido com base no uso final da madeira, pois o mesmo pode causar influência direta sobre a forma, o volume, dimensão da copa e galhos, qualidade da madeira, entre outros. (ROCHA, 2011). As diferenças entre espécies e clones também podem influenciar a qualidade da madeira para a utilização bioenergética (NEVES *et al.*, 2013).

### 3.2.4.1 Densidade

A densidade, como foi conceituada por Vital<sup>5</sup> (1984), é a quantidade de massa, expressa em peso, contida na unidade de volume (ROCHA, 2011). É uma expressão relativa dos distintos elementos celulares que a compõe (vasos, fibras, traqueídes, células de parênquima), da variação de sua parede celular, lume e espaços intercelulares e, em menor grau, à presença de constituintes estranhos. Fundamentalmente, depende de 3 fatores: da porcentagem de lenho tardio, do tamanho das células e da espessura da parede celular (SCHNEIDER, 1993).

O modo mais comum de se referir à densidade da madeira, e da biomassa em geral, é “densidade básica” (Db). Ela expressa a relação entre o peso absolutamente seco e o volume saturado da madeira. Conhecendo-se a densidade básica da madeira e o volume produzido, poderá ser feita uma estimativa da quantidade de matéria seca produzida (QUÉNO, 2009).

A densidade básica é um parâmetro da maior importância para a determinação da qualidade da madeira. No gênero *Eucalyptus*, a densidade básica pode variar entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e dentro de uma mesma árvore em função, principalmente, do ciclo de vida da árvore e das condições edafoclimáticas do povoamento (VITAL; MACIEL; DELLA LUCIA, 2006).

A variabilidade da densidade no sentido longitudinal (base-topo), quando considerada a utilização tecnológica da madeira, torna-se tão importante quanto o estudo da variação entre indivíduos. Essas variações podem ser alteradas conforme as características do próprio genótipo, idade da árvore, a amostragem, influências externas, variações ambientais e das condições representadas pelas intervenções silviculturais utilizadas no povoamento florestal (WILKINS; KITAHARA, 1991; DEBELL *et al.*, 2001; ALZATE *et al.*, 2005; SETTE JUNIOR, 2007 *apud* ELOY 2013).

---

<sup>5</sup> VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

Os resultados referentes à variação da densidade da madeira no sentido base-topo são controversos. Em estudo desenvolvido por Eloy *et al.* (2013), foi observado que os valores da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* decrescem da base até, aproximadamente, a região do DAP. A partir dessa posição, os valores são crescentes, no entanto, com pouca variação e sem tendência de estabilização com a altura. Constatou-se, ainda, que a massa específica na base foi superior àquela observada no nível superior das árvores. Estes resultados estão de acordo com os descritos por Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005) e Trevisan *et al.* (2012), que verificaram a diminuição da massa específica até a região do DAP, seguida de aumento a partir dessa posição.

Já em estudo realizado por Goulart *et al.* (2003) com o *Eucalyptus grandis*, foi verificado decréscimo da massa específica básica da madeira da posição da base para o DAP (diâmetro a altura do peito) aumentando até 75%, seguindo uma tendência decrescente até os 100% da altura comercial.

Trugilho *et al.* (2001), analisando clones de *Eucalyptus* aos 7 anos, referiram-se à densidade básica da madeira como a propriedade que mais influencia a qualidade do carvão vegetal. Esses autores concluíram que os clones que apresentaram densidade variando de 520 a 590 kg.m<sup>-3</sup> foram potenciais para a produção de carvão. No emprego direto para a geração de energia a partir da queima na forma de lenha, a madeira de maior densidade resulta num combustível de maior energia concentrada, devido à maior massa de combustível contida na mesma unidade de volume (FREDERICO, 2009).

Oliveira (1998), em trabalho desenvolvido com a madeira de eucalipto, correlacionou a densidade com alguns parâmetros anatômicos e químicos. Quanto maior a densidade básica da madeira, maior o teor de lignina e extrativos, maior a espessura e comprimento das fibras e menor o teor de holocelulose. Conforme citado por Neves *et al.* (2013), o teor de lignina afeta diretamente a qualidade e a produção do carvão vegetal (TRUGILHO *et al.*, 1997; DEMIRBAS, 2000; VALE; DIAS; SANTANA, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2012) e pode ser considerado uma das principais características da madeira associadas à produção de energia, em função da sua maior estabilidade térmica (SHAFIZADEH, 1985; GANI; NARUSE, 2007) e do seu maior teor de carbono.

Os resultados quanto ao efeito do espaçamento sobre a densidade básica da madeira também são controversos. Berger (2000), concluiu que o fator espaçamento

(espaço vital) influenciou significativamente a densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*, sendo que um maior espaço vital esteve associado a um aumento desta característica. No entanto, o próprio autor cita o estudo de Garcia *et al.* (1991), no qual a densidade básica mostrou tendências de diminuir com o aumento do espaçamento, além dos trabalhos de Brasil e Ferreira (1971), Brasil (1972), Vital *et al.* (1981), Vital e Della Lucia (1987) e Garlet (1994), nos quais a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* não foi afetada pelo espaçamento.

Goulart *et al.* (2003) constataram que apesar do efeito do espaçamento na densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* ter sido significativo, ele foi pequeno, sendo que aproximadamente 15% da variação na massa específica básica pôde ser explicada pela variação no espaço vital. Segundo os autores, essas divergências de resultados podem ser decorrentes de diversos fatores, entre eles a variabilidade genética dos povoamentos originados de sementes, conforme sugerem Ferreira (1968), Mello *et al.* (1976).

Rocha (2011), estudando o efeito do espaçamento na densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, na idade de 85 meses, observou que no espaçamento 3,0x0,5m a densidade foi significativamente inferior do que aquelas observadas nos espaçamentos maiores, tendo um incremento à medida em que a área útil ocupada por cada árvore foi aumentando. Porém, constatou que nas demais idades observadas (inferiores à 85 meses) e espaçamentos aplicados, não houveram diferenças significativas entre as densidades. Haselein *et al.* (2002), trabalhando com *Eucalyptus saligna*, também verificaram um aumento da massa específica com o aumento do espaçamento.

Rocha (2011) explica que a maior disponibilidade de água e nutrientes nos maiores espaçamentos resulta em uma maior copa e maior quantidade de fotoassimilados produzidos. Estes, por sua vez, irão regular o espessamento da parede celular e, conseqüentemente, ocasionar um aumento nos teores de densidade da madeira.

#### **3.2.4.2 Poder Calorífico**

O poder calorífico da madeira pode ser definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa

ou volume do combustível ( $\text{Kcal.kg}^{-1}$  ou  $\text{Kcal.m}^{-3}$ ) (NOGUEIRA *et al.*, 2000; QUIRINO *et al.*, 2004).

O poder calorífico divide-se em superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE; DOAT<sup>6</sup>, 1985, *apud* QUIRINO *et al.*, 2004). O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA<sup>7</sup>, 1989, *apud* QUIRINO *et al.*, 2004).

Segundo Jara<sup>7</sup> (1989, citado por Rocha, 2011), o poder calorífico superior da madeira e do carvão é muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas etc.).

Os autores Quirino *et al.* (2004), Santos *et al.* (2011) e Castro (2011) avaliaram o poder calorífico superior de algumas espécies de eucalipto em diferentes idades e obtiveram valores que variaram de 4.274 a 4.719  $\text{kcal.kg}^{-1}$  (SANTOS *et al.*, 2012).

Segundo Cunha<sup>8</sup> *et al.* (1989, citado por Quirino *et al.*, 2004), não há correlação entre a densidade básica e o poder calorífico. Entretanto, em relação ao volume de madeira a ser queimada, a densidade está positivamente ligada ao conteúdo calórico da madeira, estimulando o interesse por madeiras pesadas para a queima.

### 3.2.4.3 Teor de minerais

Os minerais presentes na madeira são importantes do ponto de vista energético pois podem, quando queimados em fornalhas, caldeiras etc., formar incrustações nos equipamentos e nas tubulações. O teor de minerais da madeira, usualmente expresso como teor de cinzas, corresponde, em geral, a menos de 1% da base de madeira absolutamente seca. Muitos desses minerais encontram-se

---

<sup>6</sup> BRIANE, D. DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation**: la fabrication du charbon de bois. Aixen-Provence: ÉDISUD, 1985. 180 p.

<sup>7</sup> JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 6 p.

<sup>8</sup> CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras**. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

presentes em combinação com compostos orgânicos, e os complexos formados desempenham funções fisiológicas. Os principais minerais encontrados são cálcio, magnésio, fósforo e silício (BARCELLOS *et al.*, 2005).

Os estudos realizados por Santana *et al.* (2012) e Neves *et al.* (2013) apontam para uma redução no teor de cinzas com o passar do tempo. Segundo Neves *et al.* (2013), esse resultado é positivo, uma vez que os minerais são indesejáveis na produção de carvão vegetal e na geração direta de bioenergia.

É importante ressaltar o risco de perda de fertilidade do solo com a extração intensiva de biomassa. A extração de todos os resíduos provoca diminuição do nível de Ca, Mg e P do solo, afetando negativamente a nutrição e o crescimento, e no final provocando maior mortalidade nas rotações seguintes (POGGIANI *et al.*, 1983).

De acordo com Poggiani *et al.* (1979, 1984), quanto mais jovem for a idade do talhão explorado, a exportação será proporcionalmente maior, principalmente se as folhas e os ramos forem também aproveitados.

Spangenberg *et al.* (1996) estudaram as perdas de nutrientes provocadas pela extração da madeira com casca de *Eucalyptus urograndis* com idade de quatro-cinco anos. Foi demonstrado que 65% de N, 54% de P, 76% de Ca, 57% de K e 61% de Mg do estoque desses nutrientes da biomassa aérea são levados durante a exploração florestal. O problema principal acontece com o cálcio, pois 65% do cálcio da biomassa é levado na casca. Isso fez com que os autores sugerissem que a casca seja deixada no sítio de exploração ou colocada de volta na forma de cinza, após a queima da lenha (QUÉNO, 2009).

#### **3.2.4.4 Umidade**

A umidade pode ser definida como a medida de quantidade de água presente na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida a secagem. É possível apresentar os valores de umidade em base seca ou base úmida, conforme a condição de referência adotada (NOGUEIRA *et al.*, 2000).

O fato de a umidade ser colocada como uma característica técnica na produção de madeira para energia é porque é necessário que a madeira seja pelo menos parcialmente seca, antes de ser usada como fonte energética (BARCELLOS *et al.*, 2005). A presença de água na madeira representa a redução do poder calorífico,

em razão da energia necessária para evaporá-la. Além disso, se o teor de umidade for muito variável, o controle do processo de combustão pode se tornar difícil (BARCELLOS *et al.*, 2005).

#### **3.2.4.5 Distribuição da biomassa**

A produção de matéria seca por árvore e sua distribuição para cada componente da parte aérea e do sistema radicular variam de acordo com a espécie, sítio e espaçamento (VITAL, 1987; BERGER, 2000; LELES *et al.*, 2001; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2012).

Leles *et al.* (2001) observaram que à medida em que as plantas são arranjadas em espaçamentos mais adensados, a contribuição das raízes para a matéria seca total vai diminuindo. Segundo os autores, estes resultados demonstram que algumas espécies, como o *Eucalyptus pellita*, alocam grande parte de fotoassimilados para a produção de raízes, quando em espaçamentos amplos, em detrimento da produção de madeira. Oliveira Neto *et al.* (2003) também constataram que a diminuição do espaçamento de plantio favoreceu, em parte, o acúmulo de biomassa na madeira, em razão do maior acúmulo de biomassa nas raízes em espaçamentos mais amplos.

Reis *et al.* (1985) verificaram que a alocação de biomassa para a madeira e para o sistema radicular varia também com o sítio. Os autores mencionam que a proporção de biomassa total de *Eucalyptus grandis* alocada para a madeira foi de 45,8%, aos 67 meses, em local de pior qualidade e de aproximadamente 60%, em idades superiores a 51 meses, em local de melhor qualidade. Aos sete anos de idade, a proporção de biomassa alocada para o sistema radicular foi de 14% para o sítio de melhor qualidade e de 32% para o sítio de pior qualidade.

### **3.3 AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO**

O crescimento de uma árvore ou de um povoamento é o mais importante fenômeno na floresta. O crescimento consiste no alongamento e engrossamento das raízes, tronco e galhos, causando mudanças na árvore e influenciando seu peso, volume e forma (SCOLFORO, 1998b).

Nos povoamentos das espécies do gênero *Eucalyptus*, as árvores são suscetíveis à competição por luz, água e nutrientes, sendo que a variabilidade do DAP (diâmetro a altura do peito) aumenta com a idade. É também comum nos povoamentos dessas espécies ocorrerem variações periódicas na taxa de mortalidade, intercalando fases de estagnação com fase de crescimento (LACERDA; COUTO, 1993).

A dinâmica de crescimento da floresta pode ser compreendida pelos estudos de crescimento e produção, que analisam a relação entre quaisquer medidas de produção florestal, dentre as quais o volume é a mais usada, em relação a variáveis como idade, qualidade do sítio e densidade do povoamento (SCHEEREN; SCHNEIDER; FINGER, 2004).

Fatos importantes podem ser mencionados a partir da FIGURA 3.1. O gráfico superior apresenta o crescimento acumulado em volume de uma floresta ao longo do tempo. Já o gráfico inferior mostra as curvas de incremento corrente anual (ICA) e incremento médio anual (IMA) desta mesma variável. Denomina-se ICA ao crescimento em volume ocorrido no período de um ano, e IMA ao resultado da divisão do volume pela idade da floresta (RODRIGUES, 1991).

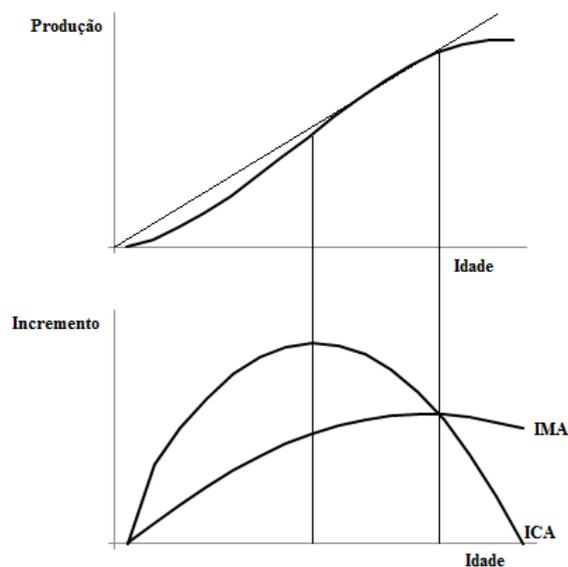


FIGURA 3.1 – CURVAS DE PRODUÇÃO, INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA).  
 FONTE: SCOLFORO (1998); Elaborado pelo autor.

Analisando a curva de produção é possível identificar três fases de desenvolvimento: fase juvenil, fase de maturidade e fase de senescência. Estas fases

estão compreendidas da origem até o ponto de inflexão da curva, quando há uma mudança no ritmo de crescimento, deste ponto até o ponto de máxima tangência e deste ponto em diante, respectivamente.

A curva de ICA alcança um máximo relativamente cedo na vida do povoamento e então declina. Seu máximo ocorre onde a forma da curva de produção é íngreme, ou seja, coincide com o ponto de inflexão da curva de crescimento acumulado. Já a curva de IMA atinge seu máximo mais tarde, sendo interceptada pela curva de ICA em seu valor máximo (SCOLFORO, 1998). O ponto em que o ICA é igual ao IMA corresponde ao ponto de máxima tangência na curva de produção, indicando a idade de máxima produtividade biológica, a qual pode ser definida como idade de rotação de uma floresta (MACHADO, 2012).

Determinar a idade ótima de corte através deste critério implica no corte da floresta quando esta atingir a idade de máximo IMA (RODRIGUES, 1991). Esta estatística tem considerável importância para o manejo já que define o momento de intervir na população, através de desbastes ou do corte raso (SCOLFORO, 1998). Justifica-se o emprego deste método se considerar-se que ao longo de várias rotações florestais se estará, em média, extraindo o maior volume possível (RODRIGUES, 1991).

Neste procedimento não são considerados efeitos de custos, taxa de juros e ainda a dimensão final do produto (SCOLFORO, 1998). A escolha de uma determinada idade de corte pode maximizar a produção anual média de uma floresta, mas não necessariamente o resultado econômico (COUTO; BATISTA; RODRIGUES, 1989). Portanto, o manejo das plantações florestais deve ser concebido para fornecer um *mix* de produtos em quantidade e qualidade apropriada e da maneira mais eficiente do ponto de vista econômico (SCOLFORO, 1998).

Dois povoamentos florestais plantados com mesmo conteúdo genético, mesmo espaçamento, mesmo tratamento silvicultural, podem ter seu padrão produtivo, qualitativo e o conseqüente valor, totalmente diferenciados, dependendo das práticas de poda e desbaste que venham a sofrer. Disso resulta a consideração que a menção do valor do incremento médio anual, muito utilizado para comparação de produtividades, deve sempre estar acompanhada do regime de manejo aplicado (SCOLFORO; MAESTRI, 1998).

Segundo a ABRAF (2013), a produtividade média ponderada, em função da área plantada, dos plantios de *Eucalyptus* de suas empresas associadas, que em 2006 era de 39,4 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, em 2012 atingiu 40,7 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

De acordo com Davis e Johnson (1987), a produtividade de uma floresta é definida em termos da quantidade produzida em dado período de tempo. Nesse sentido, quanto melhor a qualidade de um local, maior a produtividade da floresta, desde que esta apresente densidade populacional em grau de ocupação adequado (SOARES *et al.*, 2004).

A capacidade produtiva do local pode ser definida como o potencial para produção de madeira (ou outro produto) de um determinado lugar, para uma determinada espécie ou clone. Essa capacidade pode ser expressa de modo empírico (alta, média e baixa), ou por meio de índices quantitativos, como o índice de local (altura média das árvores dominantes do povoamento em uma idade específica) (CAMPOS; LEITE, 2006).

O manejo florestal e, mais especificamente, o estudo de crescimento e produção são fundamentais para o gerenciamento dos recursos florestais, uma vez que a predição é um elemento-chave para o sucesso e a sustentabilidade da atividade comercial (OLIVEIRA, 2012).

O planejamento na atividade florestal, aliado a um gerenciamento eficiente conduz ao sucesso da atividade florestal. Dois elementos são considerados básicos para que as decisões gerenciais possam ser baseadas em critérios técnicos. Um deles é o conhecimento e o domínio de toda estrutura de custos, preços e taxa de juros. O outro é a produção presente e futura que cada sítio e cada espécie podem propiciar ao longo do tempo (SCOLFORO; MAESTRI, 1998).

### **3.3.1 Modelos de crescimento**

Muitos profissionais que atuam na área técnica, na administração ou na pesquisa florestal necessitam, com frequência, quantificar variáveis que apresentam um alto custo para que sejam determinadas em grande escala. Muitas vezes, mesmo com um alto custo, é totalmente inviável a sua determinação, já que implicam na restrição da base de dados. Pode-se citar, como exemplo, a determinação do volume de árvores, o seu peso de matéria seca, a densidade da madeira ou alguma outra

característica tecnológica, os sortimentos que a árvore pode propiciar e muitas outras possibilidades (SCOLFORO, 2005).

Uma alternativa que tem sido utilizada com sucesso é fazer uso de modelos de regressão, nos quais se procura estimar a variável mais complexa de ser determinada através de uma ou mais variáveis ou, ainda, combinação destas, que sejam facilmente determinadas (SCOLFORO, 2005).

A necessidade crescente do conhecimento da situação presente dos povoamentos, assim como de sua dinâmica, têm conduzido a um contínuo aprimoramento das técnicas de construção de modelos de crescimento e produção (CAMPOS<sup>9</sup> *et al.*, 1986 *apud* RESENDE *et al.*, 2004).

O uso comum do termo “modelo de crescimento” geralmente se refere a um sistema de equações que permitem prever o crescimento e a produção de povoamentos florestais em amplas variedades de condições (VANCLAY, 1994) e em qualquer nível de análise (OLIVEIRA, 2012).

O usuário de regressão tem normalmente dois objetivos. O primeiro consiste em encontrar um modelo para representar a relação funcional entre Y e X. O segundo consiste em testar hipóteses entre a variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. Entre as várias modalidades de representar Y em função de X, pode-se considerar os modelos lineares e não-lineares (SCOLFORO, 2005).

Os modelos lineares são aqueles em que os parâmetros estão na forma aditiva. Já os não-lineares, são aqueles em que pelo menos um parâmetro não esteja na forma aditiva. Eles podem ser linearizáveis por transformações, principalmente as logarítmicas, ou não serem linearizáveis, quando não existirem propriedades que permitam tal ação. Os métodos para promover as estimativas de seus parâmetros são iterativos, podendo-se destacar Marquardt, Gauss-Newton e o Gradiente (SCOLFORO, 2005).

Segundo Scolforo (2005), o método de Marquardt compartilha com o método do gradiente a habilidade para convergir com uma estimativa inicial que pode estar fora da região de convergência e também compartilha com o método da série de Taylor (Gauss-Newton) a habilidade de convergir rapidamente após valores próximos da vizinhança do mínimo serem encontradas. Desta forma, este método combina as

---

<sup>9</sup> CAMPOS, J. C. C. *et al.* Aplicação de um modelo compatível de crescimento e produção de densidade variável em plantações de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 10, n. 2, p. 121-134, 1986.

melhores propriedades de seu predecessores, enquanto evita as mais sérias de suas limitações.

A maioria dos modelos de crescimento e produção ajustados a partir da década de 1980, até 2007, foram modelos compatíveis, do tipo povoamento total e de densidade variável (OLIVEIRA, 2007). Os modelos compatíveis se baseiam na premissa de que existe uma relação de derivação-integração entre as funções de crescimento e funções de produção para área basal e para volume do povoamento (SULLIVAN; CLUTTER<sup>10</sup>, 1972; *apud* OLIVEIRA, 2007).

As empresas florestais, em sua maioria, 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 (CARVALHO, 2010).

O mérito de uma equação volumétrica aumenta consideravelmente se ela possuir poucas variáveis, que sejam fáceis de mensurar com exatidão, que sejam altamente correlacionadas com o volume, tenham baixa correlação entre si e o volume estimado por árvore individual se aproxime do volume calculado pela técnica padrão de cubagem da árvore derrubada (GEVORKIANTZ; OLSEN, 1965).

Quando se está interessado em estimativas de crescimento, onde o interesse maior é o volume total ou a massa, tal como para produção de celulose ou energia, geralmente as informações são menos detalhadas (MENDONÇA, 2010). Se os modelos globais forem utilizados, as variáveis mais comuns são a idade, o sítio e uma medida qualquer da densidade (SCOLFORO, 1998b).

O design do modelo deve ditar seus requisitos quanto aos dados, para que o trabalho de campo possa fornecer dados suficientes e de forma eficiente (VANCLAY, 1994). De acordo com Curtis e Hyink<sup>11</sup> (1984, citado por Carvalho, 2010), em se tratando de formulações de modelos de crescimento e produção, as parcelas permanentes constituem a maior fonte de informações sobre uma floresta submetida a um dado tratamento.

---

<sup>10</sup> SULLIVAN, A. D.; CLUTTER, J. L. A simultaneous growth and yield for loblolly pine. **Forest Science**, v. 18, n. 1, p. 76-86, 1972.

<sup>11</sup> 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.

Remedições são necessárias para detectar crescimento e mudanças, e devem abranger um período de tempo suficiente para incorporar variações climáticas. O intervalo de medição deve ser longo o bastante para garantir que os padrões de crescimento não sejam ocultados por erros de medição (VANCLAY, 1994).

A amostragem para geração de equações de volume para florestas equiâneas é normalmente feita por espécie, espaçamento, classe de idade e regime de corte (CAMPOS; LEITE, 2006). Na prática, quanto maior o número de estratos maior a precisão, porém maior é o custo de amostragem (OLIVEIRA, 2007).

Com as finalidades de avaliar a capacidade produtiva e a modelagem do crescimento e produção, a amostragem deve ser representativa, sendo melhor utilizar um número menor de parcelas, porém representando toda a área em termos de classe de produtividade, do que um número muito grande de parcelas, sem representatividade de condições extremas e intermediárias (OLIVEIRA, 2007).

Com os dados de volume, área basal e número de árvores por unidade amostral são geradas estimativas por hectare ou área total, já que a área da unidade amostral é conhecida. A partir das informações por hectare em cada idade de medição, ajustam-se modelos para projeção do crescimento desses produtos para diferentes sítios e densidade de plantio (MENDONÇA, 2010).

No entanto, pode ser preciso vários anos para se obter os dados necessários a partir de parcelas permanentes. Sendo assim, a maioria dos esforços para a modelagem começa com qualquer dado disponível e a abordagem da modelagem muitas vezes pode ser ditada pela limitação dos dados (VANCLAY, 1994).

O ciclo de vida de um dado abrange sua definição, coleta, validação, armazenamento, análise e síntese. Todos estes estágios são igualmente importantes e um sistema de gerenciamento de dados eficiente requer um equilíbrio saudável entre eles. Felizmente, as exigências quanto aos dados de muitas abordagens de modelagem são semelhantes e permitem a definição de um conjunto de requisitos mínimos de dados e de procedimentos padrões a serem estabelecidos (VANCLAY, 1994).

Scolforo (1998b) define como variáveis fundamentais nos modelos de produção: a idade, sendo o tempo a definição implícita do crescimento e produção; o sítio, que define a capacidade da área em possibilitar o crescimento das árvores; a densidade, que descreve o grau de utilização de um determinado local pelas árvores em desenvolvimento; e o percentual de sobrevivência.

Muitos modelos matemáticos foram criados e testados para o ajuste de equações de volume. Apesar de o uso ter consagrado alguns desses modelos, nenhum deles será sempre o de melhor desempenho para todas as espécies e condições. Por isto, é recomendável testar vários modelos e por meio de análises estatísticas, identificar o melhor para cada caso (MACHADO; CONCEIÇÃO; FIGUEIREDO, 2002).

Entre os vários modelos existentes para expressar o volume de madeira em função do diâmetro e da altura, o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) é um dos mais difundidos na área florestal, devido às suas propriedades estatísticas, uma vez que resulta em estimativas quase sempre não tendenciosas (CAMPOS; LEITE, 2006). Este modelo tem sido ajustado, na maioria das vezes, por procedimentos de regressão linear.

Para estimativas de variáveis do povoamento, o modelo de Clutter (1963) em sua forma mais usual é um dos modelos mais difundidos e utilizados até hoje na área florestal do Brasil (CAMPOS; LEITE, 2006). É considerado um modelo em nível de povoamento, pois estima o crescimento e a produção por unidade de área a partir dos atributos idade, área basal e índice de local do povoamento (OLIVEIRA, 2012).

O modelo de Clutter também é classificado como explícito, de densidade variável, compatível e consistente. É explícito pois o cálculo da produção se dá de maneira direta; do tipo densidade variável por permitir estimar a produção em diferentes níveis de área basal inicial; compatível, dado a integral da equação de crescimento resultar na equação de produção e da derivada desta fornecer a equação de crescimento; e consistente porque a produção pode ser projetada de ano em ano ou em intervalos irregulares, além das estimativas de produção para uma mesma idade resultarem em iguais valores (CAMPOS; LEITE, 2006).

### **3.3.2 Autodesbaste**

As árvores em talhões de plantios puros tendem a expandir suas copas vertical e horizontalmente e a interceptar mais energia solar à medida em que se desenvolvem. A competição entre árvores aumenta com a idade, culminando com a dominância de algumas árvores e conseqüente morte de outras. A morte ocasionada

pela supressão é chamada de desbaste natural ou autodesbaste (PEET; CHRISTENSEN<sup>12</sup>, 1987 apud LACERDA; COUTO, 1993).

Autodesbaste é um processo natural no qual o número de árvores por unidade de área decresce à medida em que o tamanho médio das árvores aumenta com o passar do tempo. É um processo intrínseco de todas as florestas nas quais a composição e estrutura são influenciadas pela competição por espaço para o desenvolvimento (JOHNSON; SHIFLEY; ROGERS, 2002).

Reineke (1933) observou que a curva representada pelo número máximo de árvores por hectare em função do diâmetro médio, quando plotada em papel milimetrado comum, é côncava para cima, caindo rapidamente nos pequenos diâmetros e estabilizando à medida em que diâmetros maiores são atingidos. No entanto, quando plotados em papel milimetrado logarítmico, essa curva assume uma forma linear.

Reineke descobriu que o declive dessa reta poderia ser usado para definir os limites do estoque máximo ou o momento em que ocorre o autodesbaste (SPURR<sup>13</sup>, 1952, apud LACERDA; COUTO, 1993). Ele ainda descreve que os parâmetros da equação são independentes da idade e qualidade de sítio, onde a posição da linha, cujo coeficiente angular é determinado por uma constante, varia com as espécies indicando sua tolerância relativa à competição (LOUREIRO, 2013). Scolforo (1998) atribui a independência da idade e sítio deste procedimento ao diâmetro quadrático médio, que já reflete os seus efeitos.

Para muitas espécies, a inclinação de reta logarítmica é constante, mas sua elevação difere entre espécies (REINEKE, 1933). Reineke postulou que o coeficiente angular da equação assume valores próximos a -1,605 para todas as espécies arbóreas (JOHNSON; SHIFLEY; ROGERS, 2002). No entanto, valores diferentes à este foram encontrados em novos estudos a respeito do assunto. Para Schneider (2008b), o valor do coeficiente angular foi igual a -1,448 para povoamentos de *Pinus taeda*. Schneider *et al.* (2011) encontraram valor igual a -0,3321, estudando o autodesbaste em plantios de *Eucalyptus saligna*.

Segundo Zeide (1987), para aplicação do modelo, é preferível o uso de dados de parcelas permanentes, com medições sucessivas, em que a mortalidade periódica

---

<sup>12</sup> PEET, R. K.; CHRISTENSEN, N. L. Composition and tree death. **BioScience**, Washington, 37: 586-95, 1987.

<sup>13</sup> SPURR, S. H. **Forest Inventory**. New York, Ronald Press, 1952. 476 p.

é realmente observada, o que reduz as suposições a respeito do processo de autodesbaste.

A FIGURA 3.2 mostra dois ajustes do modelo proposto por Reineke para duas florestas de carvalho, nos Estados Unidos. A equação obtida com base na tabela de produção de elaborada por Schnur (1937), com dados de parcelas temporárias, e a equação obtida a partir dos dados de Gingrich (1971), com dados de parcelas permanentes, apresentaram coeficientes de inclinação iguais a -1,5 e -1,57, respectivamente.

A figura mostra que, com o passar do tempo, povoamentos abaixo da linha de autodesbaste irão crescer e se mover em direção à linha. Ao se aproximar, a trajetória de desenvolvimento do povoamento converge com a linha de autodesbaste, seguindo-a a partir da parte superior esquerda (povoamentos jovens) até a parte inferior direita (povoamentos mais velhos) (JOHNSON; SHIFLEY; ROGERS, 2002).

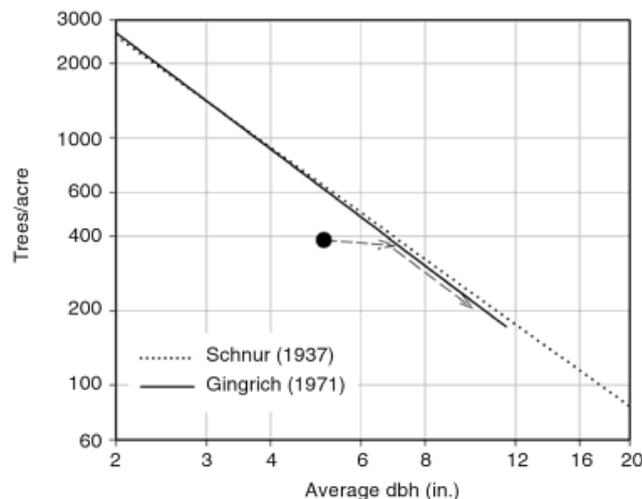


FIGURA 3.2 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE ÁRVORES POR ACRE E O DIÂMETRO MÉDIO QUADRÁTICO.

FONTE: Johnson, Shifley e Rogers (2002).

Segundo Schneider (2008b), o momento da ocorrência do autodesbaste é representado pela dimensão do diâmetro médio da população, que é dependente do espaçamento inicial, utilizado na implantação do povoamento. O autodesbaste ocorre numa dimensão de diâmetro médio diretamente proporcional ao espaçamento de plantio, indicando que quanto maior o espaçamento inicial, maior é o diâmetro médio no momento do início do autodesbaste da população.

Muitos modelos foram desenvolvidos baseados no modelo de Reineke (1933) para explicar a mortalidade das árvores pela densidade. Dentre eles, pode-se citar como mais conhecidos os modelos propostos por Yoda *et al.* (1963), Tang *et al.* (1994) e Zeide (1995).

Tang *et al.* (1994), estenderam a teoria do autodesbaste para povoamentos em densidade completa e subestocados. Os autores constataram que o autodesbaste começa antes do povoamento atingir a máxima densidade e que a taxa de autodesbaste incrementa com a densidade atingindo o máximo na densidade máxima da população (SCHNEIDER, 2011).

Segundo Loureiro (2013), o modelo de Tang se destaca dos demais pela fácil aplicabilidade após o ajuste, pois além do diâmetro médio quadrático como variável dependente apresenta a variável “densidade no tempo ‘t’ ( $N(t)$ )”, o que permite, a partir do ajuste dos dados com a máxima densidade, aplicá-lo em diferentes espaçamentos.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

#### 4.1.1 Localização

Os experimentos avaliados estão localizados no município de Três Lagoas, Mato Grosso do Sul (FIGURA 4.1). O município está situado no sul da região Centro-Oeste do Brasil, no leste de Mato Grosso do Sul (Microrregião de Três Lagoas).

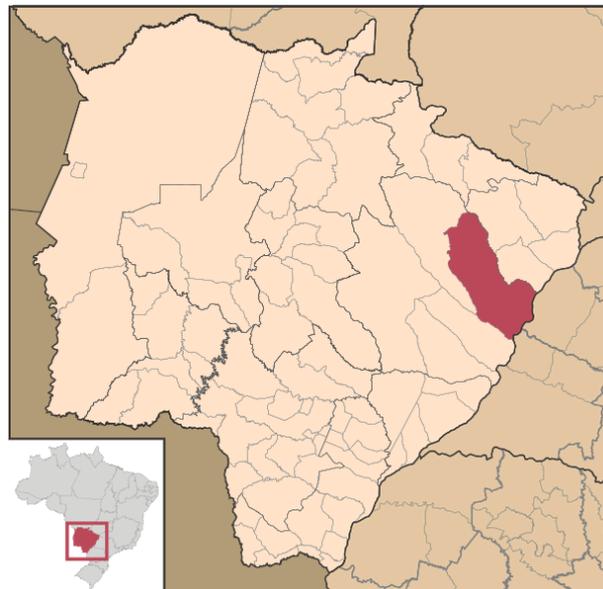


FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE TRÊS LAGOAS, MS.  
FONTE: PNUD, IPEA e FJP (2013).

#### 4.1.2 Clima

O clima, segundo Köppen, é do tipo Aw, caracterizado como Tropical quente e úmido. Apresenta temperatura média de 26°C e possui estação chuvosa no verão e seca no inverno. O total anual das precipitações está compreendido entre 900mm e 1.400mm.

O GRÁFICO 4.1 apresenta a distribuição das chuvas durante o ano, o número médio de dias com chuva por mês e a variação da temperatura. Os valores são referentes à média mensal, entre os anos de 1961 e 1990.

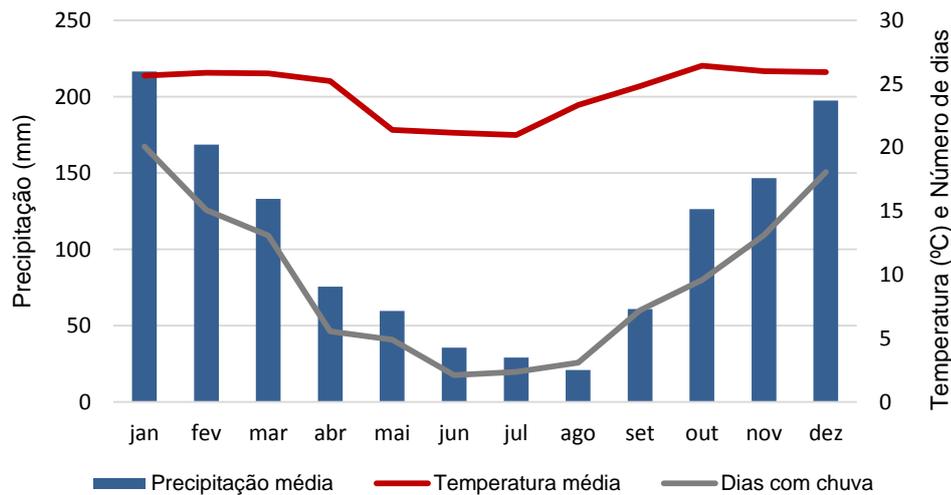


GRÁFICO 4.1 – PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO MUNICÍPIO DE TRÊS LAGOAS, MS.  
 FONTE: Dados da Rede do INMET (1961 a 1990); Elaborado pelo autor.

De acordo com a Secretaria do Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul (2011), no inverno geralmente não há chuvas durante três meses, do início de junho ao fim de agosto e, às vezes, até meados de setembro. Entre julho e setembro, há um déficit hídrico anual pouco superior a 30mm, mas a água permanece no solo durante a maior parte da estiagem. Essa estação também se encontra cada vez mais quente e raramente acontecem as geadas, que costumavam ser comuns até a década de 1980.

Assim como os invernos, os verões apresentam-se cada vez mais quentes. O regime chuvoso, no entanto, ainda não se modificou visivelmente. A média pluviométrica é de 100mm mensais entre outubro a março. Já em março, a precipitação pluviométrica começa a diminuir (MATO GROSSO DO SUL, 2011).

#### 4.1.3 Solo

O solo do município de Três Lagoas é composto, principalmente, por Latossolos Vermelho-Escuro e Nitossolos. Tratam-se de solos minerais, não hidromórficos, altamente intemperizados, apresentam horizonte B latossólico e podem ser profundos ou muito profundos, bem drenados ou acentuadamente drenados, friáveis e muito porosos. Os outros tipos de solo que podem ser encontrados em Três Lagoas são Latossolo distrófico (em regiões cobertas por faixas de Mata Atlântica), Luvisolos, Planossolos e algumas áreas de Argissolos (MATO GROSSO DO SUL, 2011).

O talhão em que foi instalado o experimento possui relevo plano (declividade menor ou igual a 3%) e o solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, com textura média. As adubações foram realizadas por cova. Desta forma, a quantidade de nutrientes distribuídos por unidade de área foi proporcional ao número de árvores existentes.

## 4.2 INSTALAÇÃO E MEDIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi implantado em dezembro de 2010. Foram utilizados quatro materiais genéticos (clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*), testados em quatro espaçamentos (1,5, 3,0, 6,0 e 9,0 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), cujas distâncias entrelinhas foram fixadas em três metros.

Para avaliação do experimento, instalado pela empresa em caráter de plantio piloto, optou-se pelo delineamento inteiramente casualizado com três repetições e arranjo fatorial dos tratamentos (4 clones e 4 espaçamentos), resultando num total de 16 tratamentos (TABELA 4.1).

TABELA 4.1 – DESCRIÇÃO DOS 16 TRATAMENTOS DO FATORIAL 4X4 (4 CLONES E 4 ESPAÇAMENTOS)

Tratamentos				Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	Arranjo (m x m)	Área útil parcela (m <sup>2</sup> )	Plantas úteis por parcela	Plantas por hectare
C1	C2	C3	C4					
1	2	3	4	1,5	3 x 0,5	22,5	15	6.666
5	6	7	8	3	3 x 1	45		3.333
9	10	11	12	6	3 x 2	90		1.667
13	14	15	16	9	3 x 3	135		1.111

C: Clone.

FONTE: O autor (2014).

Cada tratamento foi composto por três parcelas experimentais, cujo plantio foi realizado em faixa, com largura de 21 metros. Dentro de cada parcela foi instalada uma subparcela, constituída de três linhas de plantio, com cinco árvores em cada linha e com bordadura dupla nas laterais e frente (FIGURA 4.2), perfazendo um total de 45 árvores úteis por tratamento.

Devido à proximidade das parcelas dos diferentes tratamentos e às condições edafoclimáticas similares às quais todas elas estavam sob influência, o sítio ou a capacidade produtiva do local foi considerado como sendo igual para todos os tratamentos.

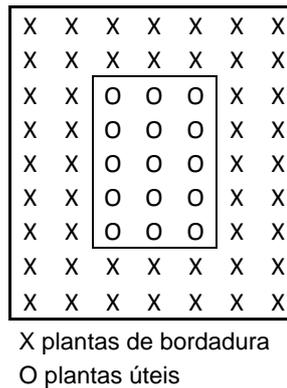


FIGURA 4.2 – CROQUI DA PARCELA E SUBPARCELA COM BORDADURA DUPLA.  
 FONTE: O autor (2014).

Foram medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura de todas as árvores úteis das subparcelas aos 6, 12, 18, 24 e 30 meses. Neste mesmo intervalo, foram escolhidas e derrubadas três árvores de diâmetro médio por tratamento, localizadas fora das subparcelas, para medição da largura da copa, cubagem e quantificação da biomassa aérea. Além destas avaliações, foram coletadas amostras das árvores derrubadas para análise da densidade básica, poder calorífico superior e teor de cinzas.

#### 4.2.1 Medição e cálculo das variáveis de interesse

A área basal por hectare foi determinada somando-se as áreas das seções transversais de todas as árvores das subparcelas e posterior extrapolação para o hectare, com base na área útil de cada subparcela.

Foi calculado o percentual de sobrevivência em campo para todas as subparcelas avaliadas. Por se tratar de um plantio com finalidade energética, árvores com ponta seca, tortas, tombadas, entre outras deformidades encontradas, foram consideradas como árvores úteis. Foram excluídas do cálculo apenas árvores mortas ou quebradas.

Para a obtenção do volume sólido por árvore, foi utilizado o método de Smalian, descrito a seguir (Equação 1), com seções medidas a 0, 25, 50, 75 e 90% da altura, além do diâmetro a 1,30m do solo (DAP).

$$V = \frac{\pi}{40000} * \left\{ \left[ \left( \frac{d_1^2 + d_2^2}{2} \right) * l \right] + \left[ \left( \frac{d_2^2 + d_3^2}{2} \right) * l \right] + \dots + \left[ \left( \frac{d_{n-1}^2 + d_n^2}{2} \right) * l \right] \right\} \quad (1)$$

Onde:

$V = \text{Volume total (m}^3\text{)}$

$d_1, d_2 \text{ e } d_3 = \text{diâmetro das seções 1, 2 e 3 (cm)}$

$d_{n-1} = \text{diâmetro da penúltima seção (cm)}$

$d_n = \text{diâmetro da última seção (cm)}$

$l = \text{altura da seção (m)}$

O volume da ponta foi calculado baseado na fórmula do cone de revolução, sendo calculado de acordo com a Equação 2.

$$v = \frac{1}{3} * \frac{\pi * d^2}{40000} * l \quad (2)$$

Onde:

$v = \text{Volume (m}^3\text{)}$

$d = \text{diâmetro da última seção (cm)}$

$l = \text{altura da seção (m)}$

A quantificação da biomassa aérea foi realizada por componente. Pesou-se em campo, separadamente, a massa verde total das folhas, galhos, casca e madeira das árvores derrubadas. Foram retiradas amostras de cada um destes componentes e, em seguida, estas foram secas em estufa, até atingir peso constante. Com base no percentual de umidade destas amostras, obtido em função do peso verde e seco, foi calculado o peso seco total de cada componente da árvore. Determinou-se também a matéria seca total (MST) por indivíduo, a partir do somatório dos pesos secos de todos os seus componentes.

Foram coletadas amostras de cerca de 1.000 gramas de cada componente para análise da densidade básica, poder calorífico superior e teor de cinzas, realizada em laboratório da empresa, segundo as normas NBR 11941:2003, 8633:1984 e 13999:2003, respectivamente.

Para obtenção desta amostra de 1.000 gramas do componente madeira, coletou-se material de todas as seções da cubagem das três árvores derrubadas, por clone e espaçamento. Este material foi picado e misturado, visando homogeneizá-lo. Foi então gerada uma amostra composta para cada clone, espaçamento e idade. Para os demais componentes, também gerou-se uma amostra composta pela picagem e homogeneização do material das árvores derrubadas.

### 4.3 AVALIAÇÕES

Com o intuito de avaliar o crescimento das árvores, sua produção e o comportamento de variáveis de maior interesse comercial nos quatro espaçamentos propostos, foram realizadas as seguintes avaliações:

- Comparação entre diâmetros das árvores das parcelas e subparcelas;
- Análise estatística das variáveis individuais e do povoamento;
- Análise gráfica (*boxplot*, distribuição diamétrica, relação hipsométrica, crescimento e produção, mortalidade);
- Biomassa da parte aérea (distribuição, propriedades físicas e energéticas);
- Modelos de crescimento (volume e biomassa);
- Crescimento e produção;
- Limites de estoque (autodesbaste).

#### 4.3.1 Comparação entre diâmetros

Foi realizada uma comparação entre os valores médios dos diâmetros das subparcelas e os diâmetros das árvores escolhidas para a cubagem, supostamente de dimensões médias.

Em todas idades de medição, foram calculados os diâmetros médios das árvores presentes nas subparcelas, para cada espaçamento e clone. Em seguida, determinou-se um intervalo de confiança com significância de 5% para estas médias, conforme a Equação 3, e foi avaliado se os diâmetros das árvores cubadas estavam contidos ou não neste intervalo.

Segundo Vieira (1980), esta equação é o intervalo de confiança para a média da população e, com significância ( $\alpha$ ) de 5%, 95% dos intervalos calculados dessa forma devem conter a média da população. Com base neste conceito, indivíduos com diâmetros dentro deste intervalo foram considerados como de dimensões médias.

$$IC = \left\{ \bar{x} \pm t_{\alpha} * \frac{s}{\sqrt{n}} \right\} \quad (3)$$

Onde:

$IC$  = intervalo de confiança

$\bar{x}$  = diâmetro médio da parcela

$t = \text{valor de "t" tabelado } (\alpha: 0,05)$

$s = \text{desvio padrão}$

$n = \text{número de indivíduos}$

#### 4.3.2 Análise estatística

A análise de variância (ANOVA) das variáveis apresentadas na TABELA 4.2 foi realizada para os dados das subparcelas e das árvores selecionadas para cubagem, tendo espaçamento e clone como fatores principais, nas idades 12 e 30 meses. Foi utilizado o teste de comparação de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância, para controle do erro tipo I.

TABELA 4.2 – VARIÁVEIS DE INTERESSE ANALISADAS.

Variável	Unidade
Diâmetro à altura do peito (DAP)	cm
Altura	m
Largura da copa	m
Área basal por hectare (G)	m <sup>2</sup> /ha
Sobrevivência	%
Volume individual com casca	m <sup>3</sup>
Volume individual sem casca	m <sup>3</sup>
Biomassa individual da parte aérea (MST)	kg

MST: Matéria Seca Total.

FONTE: O autor (2014).

De forma preliminar à ANOVA, procedeu-se ao teste de Bartlett à 5% de significância. As variáveis submetidas à este teste que não apresentaram variâncias homogêneas tiveram seus valores originais transformados, a fim de atender este requisito da ANOVA. Da mesma forma, a variável sobrevivência, expressa em percentagem, também teve seus valores transformados, sendo utilizada a raiz dos valores observados.

#### 4.3.3 Análise gráfica

Para a análise gráfica do desenvolvimento dos plantios experimentais, foram utilizados os dados de DAP e altura das árvores, provenientes das subparcelas, e dados de volume e matéria seca das árvores cubadas, nas idades 6, 12, 18, 24 e 30 meses.

#### 4.3.3.1 Diagrama de caixa (*Boxplot*)

O diagrama de caixa, ou *boxplot*, permite avaliar a dispersão dos dados, sua simetria e a existência ou não de valores discrepantes, sendo especialmente adequado para a comparação de dois ou mais conjuntos de dados. É formado pelo primeiro e terceiro quartil e pela mediana (FIGURA 4.3).

A diferença entre o terceiro e o primeiro quartil é denominada desvio-quartil ou amplitude interquartílica. Trata-se de uma medida de dispersão que não é afetada por valores extremos (SILVA, 2011). Bussab (2002) descreve esses quartis como medidas de localização resistentes de uma distribuição, que são medidas pouco afetadas por mudanças de uma pequena porção dos dados.

A caixa representa um intervalo de valores no qual se encontram 50% dos dados observados, sendo a linha que a divide ao meio equivalente à mediana do conjunto de observações. Os 50% restantes dos dados se encontram divididos igualmente acima e abaixo da caixa.

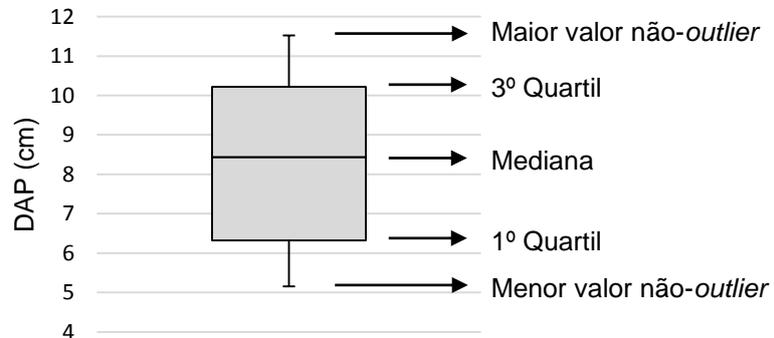


FIGURA 4.3 – MODELO DE DIAGRAMA DE CAIXA (*BOXPLOT*).  
FONTE: O autor (2014).

As hastes inferiores e superiores se estendem, respectivamente, do quartil inferior até o menor valor não inferior ao limite inferior e do quartil superior até o maior valor não superior ao limite superior (SILVA, 2011). Os limites são calculados conforme a Equação 4.

$$\text{Limite inferior} = Q1 - 1,5(Q3 - Q1)$$

$$\text{Limite superior} = Q3 + 1,5(Q3 - Q1)$$

(4)

Onde:

$Q1$  e  $Q3$  = primeiro e terceiro quartis

Segundo Bussab (2002), para dados com uma distribuição normal, 99,3% dos seus valores se encontram entre estes dois limites, ou seja, os pontos exteriores constituirão cerca de 0,7% da distribuição.

Os valores fora destes limites foram considerados como valores discrepantes ou atípicos (*outliers*) e, por estarem muito afastados da grande parte dos dados, foram excluídos das análises seguintes, referentes à distribuição diamétrica, relação hipsométrica, crescimento e produção. Estes *outliers* foram representados nos gráficos por seus valores máximos, mínimos e médios.

A determinação de valores *outliers* foi feita de maneira independente em cada uma das idades. Ou seja, valores considerados como *outliers* na idade 6 meses não foram excluídos da avaliação aos 12 meses, podendo estes valores ser considerados ou não como *outliers* nesta nova avaliação. Uma redução no número de *outliers* com o passar da idade é consequência do crescimento das árvores, ou da sua morte.

#### 4.3.3.2 Distribuição diamétrica

A distribuição diamétrica dos plantios nos quatro espaçamentos testados foi avaliada a partir da idade 12 meses, para cada clone. O número de classes foi definido com auxílio da fórmula de Sturges (Equação 5). A amplitude, ou intervalo de classe, foi calculada pela divisão da amplitude total dos dados pelo número de classes definido.

$$k = 1 + 3,3 \log_{10} n \quad (5)$$

Onde:

$k$  = número de classes

$n$  = número total de observações

#### 4.3.3.3 Relação hipsométrica

Para evidenciar a relação existente entre o diâmetro e a altura das árvores e sua evolução com o passar da idade, foi representada graficamente a dispersão da altura em função do DAP ao longo do período avaliado, com destaque para os diferentes clones e espaçamentos utilizados, visando também gerar informações capazes de nortear o ajuste de modelos hipsométricos em uma situação prática para conjuntos de dados similares.

#### 4.3.3.4 Crescimento e Produção

Foram utilizados nesta análise os dados DAP, altura e área basal, provenientes das subparcelas, e os dados volume e matéria seca, obtidos no processo de cubagem e quantificação da biomassa.

Avaliou-se o comportamento destas variáveis com o passar do tempo, de acordo com o espaçamento de plantio. Primeiramente, os espaçamentos foram avaliados independentemente dos materiais genéticos, a partir da média dos quatro clones utilizados, em cada idade. Em seguida, os materiais genéticos e os espaçamentos foram avaliados conjuntamente, na idade 30 meses. O Incremento Médio Anual (IMA) foi calculado dividindo o valor da variável em análise pela sua idade em anos.

Em seguida, foi representada a taxa de mortalidade dos materiais genéticos ocorrida em cada espaçamento. Neste cálculo, foram incluídas árvores classificadas na ocasião da coleta de dados como mortas ou quebradas, além de falhas encontradas nas parcelas.

#### 4.3.4 Biomassa da parte aérea

Para análise da biomassa da parte aérea, foi avaliada sua distribuição por componente, suas propriedades físicas e energéticas e sua produção potencial de energia.

A distribuição por componente da árvore foi avaliada para cada espaçamento e idade, com valores referentes às médias dos quatro clones. Com base nos dados obtidos para cada componente, referentes à quantidade de matéria seca produzida, densidade básica, poder calorífico e teor de cinzas, foram calculadas a densidade energética ( $Mcal/m^3$ ) e a energia potencial ( $Gcal/ha$ ) por componente, segundo as Equações 6 e 7, respectivamente. Calculou-se também a energia potencial total pela soma da energia de todos os componentes da árvore.

$$DE = (PCS * db)/10^3 \quad (6)$$

Onde:

$DE =$  densidade energética ( $Mcal/m^3$ )

$PCS =$  poder calorífico superior ( $kcal/kg$ )

$db =$  densidade básica ( $kg/m^3$ )

$$EP = (PCS * MS)/10^6 \quad (7)$$

Onde:

*EP* = energia potencial (Gcal/ha)

*PCS* = poder calorífico superior (kcal/kg)

*MS* = matéria seca (kg/ha)

Para avaliar o efeito do espaçamento, clone e idade sobre as variáveis apresentadas na TABELA 4.3, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com auxílio do *software* R, tendo estes fatores como fontes de variação. Em seguida, foram elaborados gráficos que representam o comportamento destas variáveis com o passar do tempo, permitindo uma melhor visualização dos resultados obtidos na ANOVA.

TABELA 4.3 – VARIÁVEIS DE BIOMASSA E ENERGIA AVALIADAS.

Variável	Unidade
MST/ha	t/ha
Teor de Cinzas Madeira	%
PCS Madeira	kcal/kg
Densidade Básica Madeira	g/cm <sup>3</sup>
Densidade Energética Madeira	kcal/m <sup>3</sup>
Energia Potencial Madeira	Gcal/ha
Energia Potencial Total	Gcal/ha

MST/ha: Matéria Seca Total por hectare; PCS: Poder Calorífico Superior.  
 FONTE: O autor (2014).

Para gerar informações mais detalhadas a respeito da produção de energia aos 30 meses, final do período avaliado, foi realizada uma nova análise de variância apenas para dados desta idade e, em seguida, feito o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de 5% de significância. Foram analisadas as variáveis matéria seca por hectare, energia potencial da madeira e energia potencial total, tendo como fatores de variação o espaçamento de plantio e o clone utilizado.

#### 4.3.5 Modelos de crescimento – Volume e Biomassa

A base de dados utilizada para todos os procedimentos de modelagem é composta pelas medidas de DAP (cm), altura total (m), volume (m<sup>3</sup>) e matéria seca total (kg), obtidas no processo de cubagem e quantificação da biomassa, e pelos valores de área basal (m<sup>2</sup>/ha), calculados a partir das subparcelas.

Estes dados são referentes às idades 6, 12, 18, 24 e 30 meses, com exceção do volume, que não foi determinado na primeira medição. Desta forma, a base de dados é composta por 192 árvores para o ajuste de modelos volumétricos e por 240 árvores para modelos de biomassa, plantadas nos quatro espaçamentos propostos e de quatro clones diferentes.

Foram testados modelos tradicionais para estimativa de volume e biomassa individual e, em seguida, foi ajustado o modelo global, proposto por Clutter (1963), para estimativa da produção por hectare.

Pela insuficiência de dados para ajustar modelos que contemplem apenas um espaçamento, um clone e uma idade, foram testadas diferentes estratificações, agrupando os dados de cada um destes fatores. O agrupamento selecionado foi aquele que proporcionou melhores estimativas da variável dependente em análise.

A precisão de ajuste dos modelos foi avaliada em função dos critérios estatísticos coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ), índice de ajuste de Schlaegel (IA), erro padrão da estimativa (Syx%) e análise gráfica dos resíduos. O IA é comparável ao  $R^2$  ajustado. No entanto, ele serve para corrigir o  $R^2$  em equações cuja variável dependente sofreu transformações. As equações apresentadas a seguir mostram como foram obtidos estes critérios.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

$$R^2_{ajustado} = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}$$

(8)

Onde:

$R^2$  = coeficiente de determinação

$R^2_{ajustado}$  = coeficiente de determinação ajustado

$Y_i$  = Variável dependente observada

$\hat{Y}_i$  = Variável dependente estimada pela equação ajustada

$\bar{Y}$  = Média aritmética da variável dependente observada

$n$  = tamanho da amostra (número de árvores)

$p$  = número de coeficientes da equação ajustada

$$IA = 1 - \frac{SQRes}{SQT}$$

$$SQRes = \sum_{i=0}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$SQT = \sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

Onde:

$SQRes$  = Somatória dos Quadrados dos Resíduos

$SQT$  = Somatória dos Quadrados Totais

$$Syx = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad \text{ou} \quad Syx = \sqrt{\frac{SQRes}{n - p}}$$

$$Syx \% = \frac{Syx}{\bar{Y}} * 100 \quad (10)$$

Onde:

$Syx$  = Erro padrão da estimativa ( $m^3$ )

$Syx$  % = Porcentual do erro padrão da estimativa

$$Erro\% = \frac{(Y - \hat{Y})}{Y} * 100 \quad (11)$$

#### 4.3.5.1 Modelos tradicionais para estimativas individuais

A TABELA 4.4 apresenta os modelos testados para estimar o volume individual e seus respectivos autores. Para estimativa da matéria seca total, foi feita a adaptação dos modelos volumétricos, substituindo a variável dependente pelo peso seco total em kg.

TABELA 4.4 – MODELOS TRADICIONAIS APLICADOS.

Modelo	Autor	Ano
$V_i = b_0 + b_1(d^2 * h) + \varepsilon_i$	Spurr	1952
$\ln V_i = b_0 + b_1 * \ln(d^2 * h) + \varepsilon_i$		
$V_i = b_0 * (d^{b_1} * h^{b_2}) + \varepsilon_i$	Schumacher e Hall	1933
$\ln V_i = b_0' + b_1 * \ln d + b_2 * \ln h + \varepsilon_i$		

FONTE: O autor (2014).

Onde:

$V_i$  = volume estimado ( $m^3$ )

$d$  = diâmetro à 1,30 m do solo (cm)

$h$  = altura total (m)

$b_0; b_1; b_2$  = coeficientes da equação

$\varepsilon_i$  = erro envolvido no processo de estimativa

O cálculo dos coeficientes ( $b_0, b_1$  e  $b_2$ ) do modelo não-linear de Schumacher e Hall foi realizado com o auxílio de *software* estatístico STATISTICA, pelo método de Marquardt. Os demais modelos foram ajustados por regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o *software* EXCEL.

Para estimativa do volume individual, o ajuste dos modelos foi feito combinando espaçamento e idade e agrupando os quatro clones, enquanto para estimativa da matéria seca da árvore, o ajuste foi feito combinando clone e idade, agrupando os quatro espaçamentos. Desta forma, foram feitos 16 ajustes para cada modelo de volume e 20 ajustes para cada modelo de biomassa, utilizando dados de 12 árvores por ajuste em ambos os casos.

Após selecionadas as melhores equações, estimou-se o volume e a matéria seca individual de todas as árvores das subparcelas. Foram somados o volume e a matéria seca total de todas as árvores de cada subparcela e, em seguida, estes valores foram extrapolados para o hectare com base na área útil da parcela. As produções por hectare estimadas para a idade 30 meses foram submetidas à análise de variância (ANOVA), tendo como fatores o espaçamento e o clone.

#### 4.3.5.2 Modelagem global

A partir dos dados de volume e matéria seca por hectare, procedeu-se ao ajuste do modelo de Clutter (1963), apresentado nas Equações 12 e 13, pelo método dos mínimos quadrados em dois estágios. O ajuste foi feito por regressão linear, utilizando o *software* EXCEL.

$$\ln G_2 = \ln G_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + b_0 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + b_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \varepsilon_i \quad (12)$$

$$\ln V_2 = b_0 + \left( \frac{b_1}{I_2} \right) + b_2 S + b_3 \ln G_2 + \varepsilon_i \quad (13)$$

Onde:

$G_1$  e  $G_2$  = área basal nas idades 1 e 2 ( $m^2/ha$ )

$V_1$  e  $V_2$  = volume por hectare nas idades 1 e 2 ( $m^3/ha$ )

$I_1$  e  $I_2$  = idade 1 e 2 (meses)

$S$  = índice de sítio

$b_0; b_1; b_2; b_3$  = coeficientes da equação

$\ln$  = logaritmo neperiano

$\varepsilon_i$  = erro envolvido no processo de estimativa

O modelo proposto leva em consideração a idade, a área basal e o índice de sítio. Como toda a área do experimento foi classificada como de mesma capacidade produtiva, a inclusão do sítio no modelo foi feita utilizando o incremento médio anual (IMA) em volume aos 30 meses de idade, alcançado pelos clones em cada espaçamento.

Os ajustes do modelo, tanto para volume quanto para biomassa, foram feitos por espaçamento e idade, agrupando os quatro clones. Por se tratarem de variáveis por unidade de área, com grande diferença entre os espaçamentos, esta foi a estratificação mais adequada.

Após o ajuste com os dados disponíveis, fez-se a projeção do crescimento para idades futuras, na qual foram estimados os valores de volume e biomassa por hectare nas idades 36, 42, 48 e 54 meses.

#### **4.3.6 Crescimento e produção**

A partir das estimativas de área basal, volume e biomassa por hectare utilizadas para o ajuste do modelo de Clutter, nas idades de 12 aos 30 meses, e de suas projeções para as idades de 36 aos 54 meses, foram calculados os incrementos médio e corrente anuais (IMA e ICA), para cada clone e espaçamento. Estes resultados permitiram a criação dos gráficos de crescimento e produção, nos quais é possível avaliar os estágios de desenvolvimento das variáveis em questão.

Para a identificação da idade de rotação ótima para cada espaçamento, avaliou-se a produção por hectare considerando sucessivas rotações. Foram comparadas as idades apontadas como de máxima produtividade biológica pelos valores de ICA e IMA, utilizando os valores de produção acumulada numa idade de corte comum à todas as rotações.

Para efetuar esta análise, foi identificado o mínimo múltiplo comum (MMC) das rotações e, em seguida, multiplicou-se as produções de cada rotação pelo número de rotações ocorridas até esta idade de corte comum.

Após definidas as idades de rotação ótimas para cada espaçamento, comparou-se suas produções, presumindo a perpetuidade dos plantios.

### 4.3.7 Limites de estoque

Utilizando os dados de diâmetro médio quadrático (Dg) e número de árvores por hectare (N/ha) de cada subparcela, ajustou-se o modelo de Tang *et al.* (1994), o qual define limites de densidade suportados pelos povoamentos. O Dg foi calculado conforme a Equação 14 e o N/ha determinado a partir do número de árvores da parcela e posterior extrapolação para o hectare, em função da sua área útil.

$$Dg = \sqrt{\frac{40000 \bar{g}}{\pi}} \quad (14)$$

Onde:

$Dg$  = diâmetro médio quadrático (cm)

$\bar{g}$  = área transversal média da parcela (m<sup>2</sup>)

O número de árvores por hectare em função do Dg foi representado graficamente, para todos espaçamentos e idades avaliados, visando identificar se em alguma situação houve um declínio repentino da densidade de árvores por hectare, indicando que o limite de estoque havia sido alcançado e o processo de autodesbaste havia iniciado.

Nas situações em que foi verificada a ocorrência do autodesbaste, procedeu-se ao ajuste do modelo, conforme a Equação 15, com auxílio do *software* SAS.

$$\ln(N)_{(t)} = \ln(S_f) - \frac{1}{\gamma} \ln[(d_t/d_0)^{\beta\gamma} + (S_f/N_1)^\gamma - (d_1/d_0)^{\beta\gamma}] \quad (15)$$

Onde:

$t$  = idade do povoamento

$N_{(t)}$  = densidade no tempo  $t$

$S_f$  = índice mínimo de densidade do povoamento

$d_t$  = diâmetro médio quadrático das árvores no tempo  $t$

$d_0$  = diâmetro básico padrão (25 cm)

$\beta$  = parâmetro da taxa máxima de autodesbaste de densidade completa

$\gamma$  = índice de autodesbaste

$N_1$  = densidade inicial do povoamento

$d_1$  = diâmetro médio quadrático inicial

A precisão de ajuste do modelo foi avaliada em função dos critérios estatísticos, índice de ajuste de Schlaegel (IA), erro padrão da estimativa (Syx%) e pela análise gráfica dos resíduos.

O modelo ajustado permitiu obter a curva decrescente da máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio quadrático. Em seguida, utilizando os coeficientes do modelo ajustado para o povoamento completamente estocado, foram estimados os limites de densidade dos demais espaçamentos e identificado o momento em que o processo de autodesbaste deverá ter início em cada uma das situações.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 COMPARAÇÃO ENTRE DIÂMETROS

A TABELA 5.1 revela o número de indivíduos selecionados para a cubagem e quantificação de biomassa que apresentaram valores de DAP dentro do intervalo de confiança da média. São apresentados os resultados por espaçamento, clone e idade, além do somatório dos resultados por espaçamento e idade.

TABELA 5.1 – NÚMERO DE INDIVÍDUOS CUBADOS E INDIVÍDUOS COM DAP DENTRO DO INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA PARA CADA ESPAÇAMENTO, CLONE E IDADE.

Clone	Idade	Árvores Cubadas*	Espaçamento			
			3x0,5	3x1	3x2	3x3
1	12	3	0	1	3	2
	18		3	2	3	3
	24		3	3	3	3
	30		3	3	3	3
2	12	3	0	3	3	1
	18		0	2	2	0
	24		3	3	3	3
	30		3	3	2	3
3	12	3	0	3	0	0
	18		1	3	0	0
	24		3	3	3	3
	30		3	3	3	3
4	12	3	3	3	3	3
	18		2	3	1	2
	24		3	3	3	3
	30		3	3	3	3
Total	12	12	3	10	9	6
	18		6	10	6	5
	24		12	12	12	12
	30		12	12	11	12

\*: Número total de árvores derrubadas e medidas por espaçamento, clone e idade.

FONTE: O autor (2014).

Nota-se que nem todas as árvores selecionadas apresentaram DAP dentro do intervalo calculado. Este fato ocorreu devido à ausência de árvores de dimensões médias na parcela, ocasionada pela amostragem destrutiva das árvores no processo

de cubagem e quantificação de biomassa. Nestes casos, mediu-se as árvores com diâmetro e altura mais próximos da média.

Praticamente todos os indivíduos com DAP fora do intervalo calculado apresentaram dimensões superiores à este intervalo, sendo observado apenas um indivíduo com DAP inferior, ocorrido no espaçamento 3x2m, aos 18 meses de idade, para um indivíduo do clone 4.

Nas idades 12 e 18 meses foram observados a maior parte dos dados fora do intervalo de confiança da média. Aos 24 e 30 meses, apenas um indivíduo não esteve contido neste intervalo. Quanto aos espaçamentos, o espaçamento 3x0,5m foi o que apresentou o maior número de dados fora do intervalo calculado, seguido pelos 3x3, 3x2 e 3x1m, nesta sequência.

Os GRÁFICOS 5.1 ao 5.4 ilustram os resultados apresentados anteriormente. Neles é possível observar o diâmetro médio das subparcelas, a amplitude do intervalo de confiança e a dispersão dos dados das árvores cubadas, separados por espaçamento, clone e em diferentes idades.

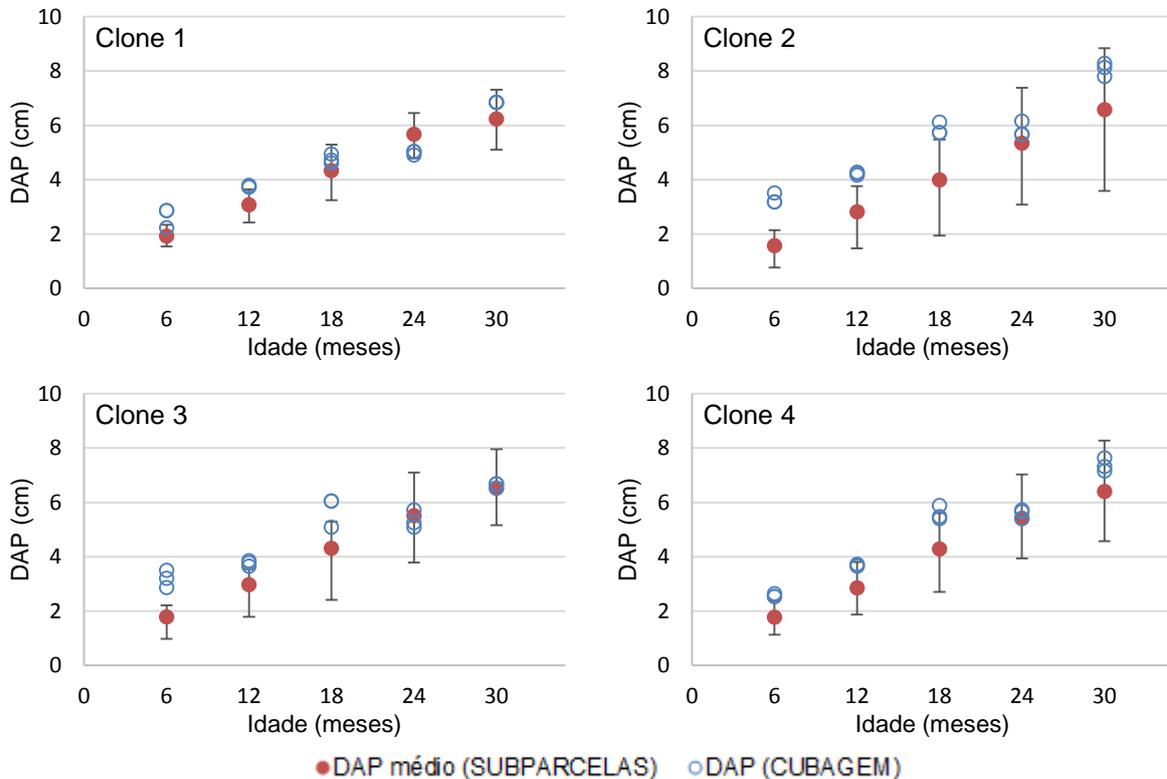


GRÁFICO 5.1 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x0,5M.

FONTE: O autor (2014).

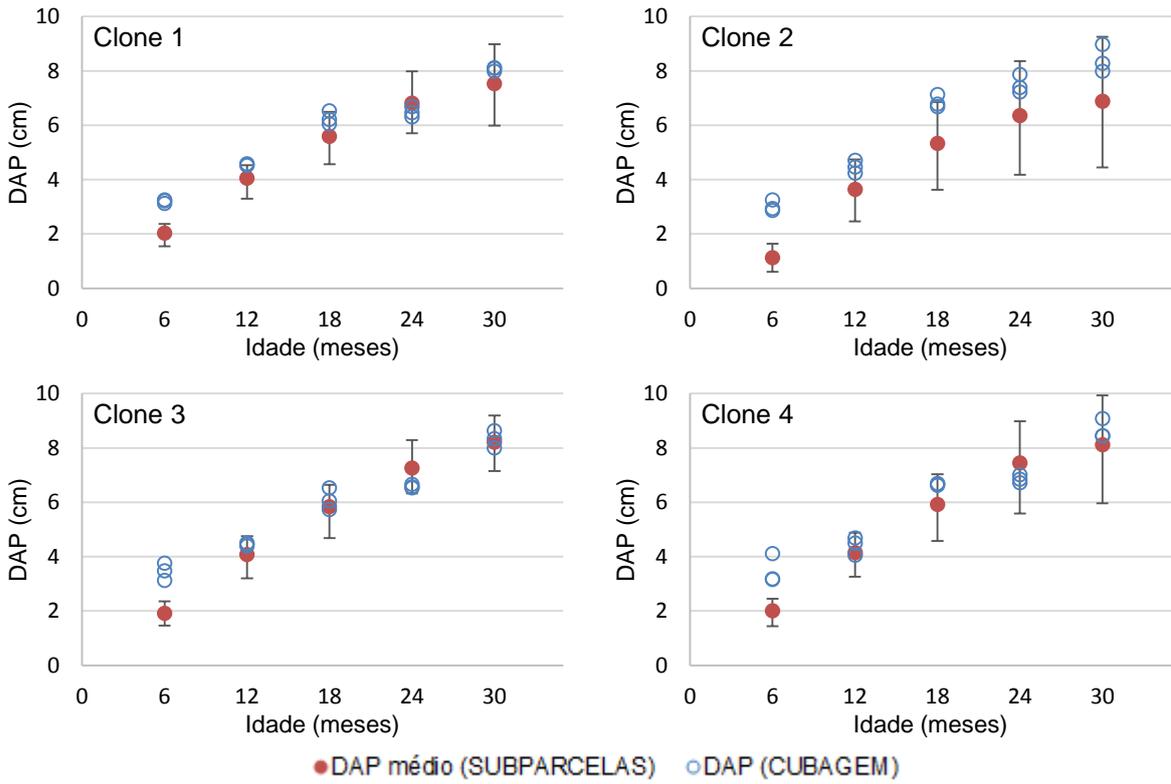


GRÁFICO 5.2 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x1M.  
 FONTE: O autor (2014).

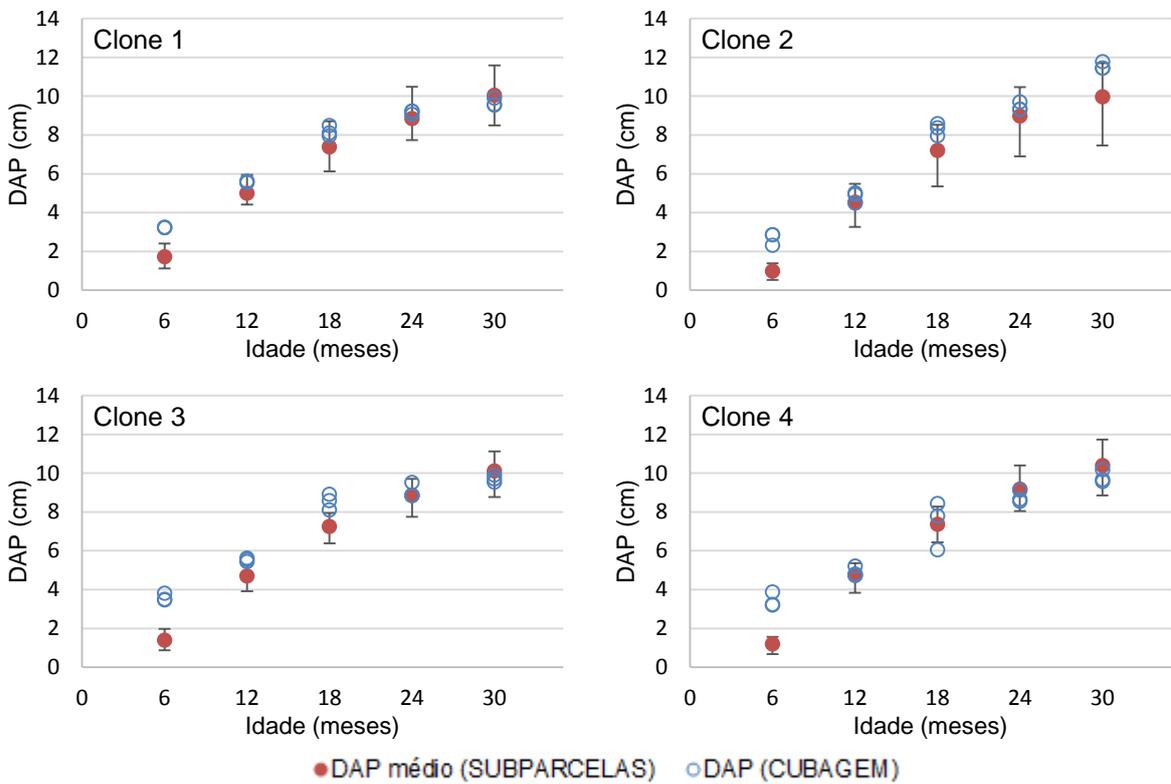


GRÁFICO 5.3 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x2M.  
 FONTE: O autor (2014).

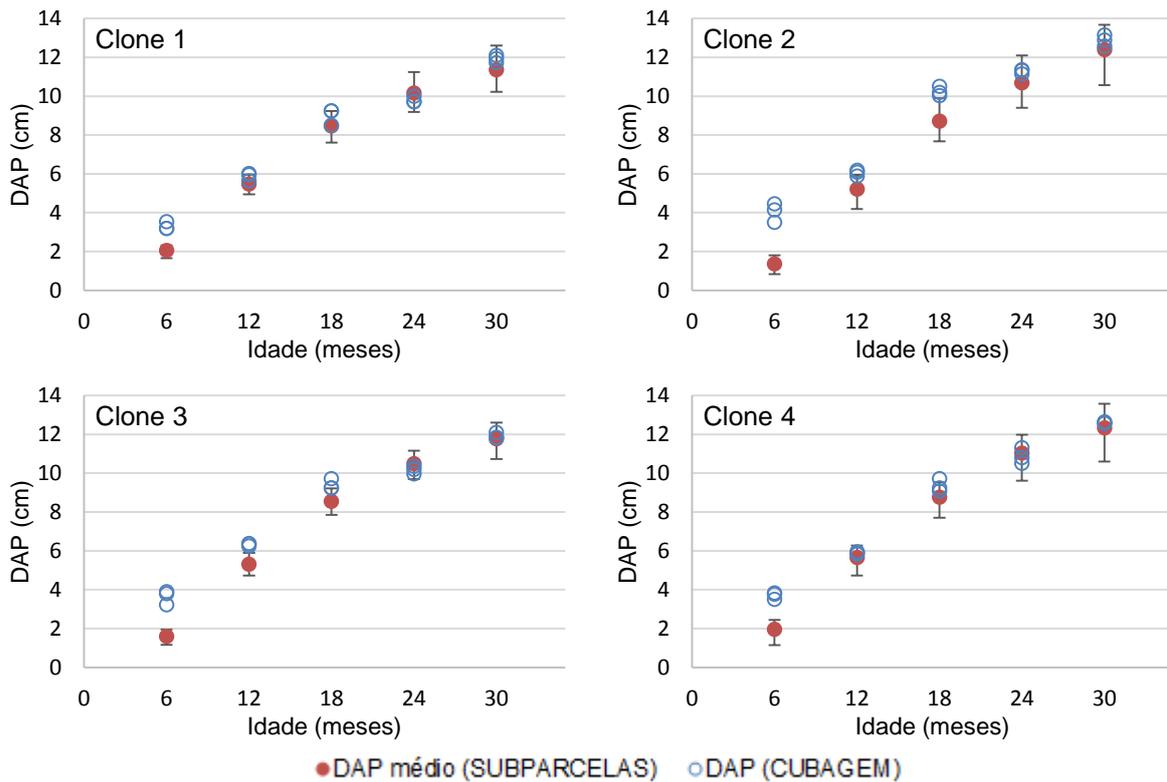


GRÁFICO 5.4 – INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA E DISPERSÃO DOS VALORES DE DAP POR CLONE E IDADE NO ESPAÇAMENTO 3x3M.

FONTE: O autor (2014).

Apesar de alguns valores não se enquadrarem como médios, todos os dados das árvores derrubadas e medidas foram utilizados nas demais avaliações. Contudo, estes resultados foram levados em consideração nas análises seguintes e na interpretação dos seus resultados.

## 5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

### 5.2.1 Dados das subparcelas

Os resultados da análise de variância dos dados das subparcelas aos 12 meses são apresentados abaixo (TABELA 5.2). O fator espaçamento foi significativo para quase todas as variáveis, exceto para o percentual de sobrevivência, enquanto o clone teve efeito significativo apenas para a variável altura.

Não foram observadas interações significativas entre os fatores, para todas as variáveis analisadas. Desta forma, a TABELA 5.3 apresenta diretamente os resultados médios por fator e sua classificação segundo o teste de Tukey.

TABELA 5.2 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DAS SUBPARCELAS AOS 12 MESES.

Fonte de Variação	DAP	Altura	Área Basal	Sobrevivência
Espaçamento	258,03 **	32,56 **	110,49 **	1,29 ns
Clone	2,38 ns	27,59 **	2,81 ns	1,53 ns
Esp. x Clone	0,84 ns	2,01 ns	1,09 ns	0,91 ns

\*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%; ns: não significativo.

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.3 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 12 MESES PARA VARIÁVEIS DAP, ALTURA, ÁREA BASAL E SOBREVIVÊNCIA.

Fator	Nível	Variável			
		DAP (cm)	Altura (m)	Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)	Sobrevivência (%)
Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	2,93 D	4,97 B	5,12 A	97,8 A
	3,0	3,97 C	5,82 A	4,49 A	98,9 A
	6,0	4,75 B	5,91 A	3,14 B	97,8 A
	9,0	5,41 A	6,10 A	2,67 B	100,0 A
Clone	1	4,40 A	6,37 A	3,94 A	98,3 A
	2	4,05 A	5,51 B	3,61 A	97,2 A
	3	4,27 A	5,32 B	3,82 A	100,0 A
	4	4,35 A	5,61 B	4,04 A	98,9 A
DMS		0,51	0,67	0,84	6,42

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ).

FONTE: O autor (2014).

Aos 12 meses de idade, ainda são pequenas as variações entre espaçamentos e, principalmente, entre clones. No entanto, percebe-se que quanto maior a área disponível por planta, maior foi o crescimento das variáveis individuais e menor foi a taxa de mortalidade. Já para a área basal, variável por unidade de área (m<sup>2</sup>/ha), devido ao número de plantas por hectare, menores espaçamentos geraram maiores valores.

Os resultados da ANOVA para dados das subparcelas aos 30 meses são apresentados na TABELA 5.4. O fator espaçamento foi significativo para todas as variáveis avaliadas, enquanto o fator clone não teve efeito significativo no crescimento em altura e no percentual de sobrevivência.

TABELA 5.4 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DAS SUBPARCELAS AOS 30 MESES.

Fonte de Variação	DAP	Altura	Área Basal	Sobrevivência
Espaçamento	406,10 **	179,92 **	34,70 **	27,75 **
Clone	3,35 *	0,90 ns	11,25 **	1,82 ns
Esp. x Clone	2,21 *	2,21 *	1,17 ns	0,78 ns

\*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%; ns: não significativo.

FONTE: O autor (2014).

Para as variáveis DAP e altura, as interações entre fatores foram significativas, indicando que o desempenho do espaçamento de plantio dependeu do clone utilizado e vice-versa. Desta forma, a TABELA 5.5 apresenta os resultados do teste de Tukey para estas variáveis, tendo o fator espaçamento em função do fator clone nas colunas e o clone em função do espaçamento nas linhas.

TABELA 5.5 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEIS DAP E ALTURA.

Variável	Fator	Nível	Clone			
			Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4
DAP (cm)	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	6,23 D a	6,58 C a	6,40 D a	6,41 D a
		3,0	7,53 C ab	6,88 C b	7,97 C a	8,12 C a
		6,0	9,96 B a	9,98 B a	10,12 B a	10,39 B a
		9,0	11,36 A b	12,40 A a	11,77 A ab	12,33 A a
		DMS	0,95			
Altura (m)	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	12,25 C a	12,68 C a	11,96 C a	11,72 D a
		3,0	13,92 B a	12,52 C a	13,52 B a	13,52 C a
		6,0	15,73 A a	16,02 B a	15,52 A a	15,79 B a
		9,0	16,85 A a	17,49 A a	16,41 A a	17,43 A a
		DMS	1,28			

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, com maiúscula na coluna e minúscula na linha; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ).

FONTE: O autor (2014).

Aos 30 meses de idade, manteve-se a tendência observada aos 12 meses. Os espaçamentos mais amplos foram responsáveis por um maior crescimento das variáveis individuais, inclusive a altura, independentemente do material genético utilizado. Quanto aos clones, os resultados revelam pouca variação entre eles no crescimento individual das árvores.

As variáveis área basal e sobrevivência não apresentaram interações significativas entre os fatores (TABELA 5.4), sendo os resultados médios por fator e sua classificação segundo o teste de Tukey apresentados na TABELA 5.6.

TABELA 5.6 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEIS ÁREA BASAL E SOBREVIVÊNCIA.

Fator	Nível	Variável	
		Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)	Sobrevivência (%)
Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	17,78 A	75,56 B
	3,0	16,28 AB	95,00 A
	6,0	13,77 B	96,11 A
	9,0	12,49 C	97,22 A
Clone	1	13,51 B	88,33 A
	2	14,89 AB	89,44 A
	3	15,08 AB	91,67 A
	4	16,84 A	94,44 A
	DMS	3,13	14,66

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ).

FONTE: O autor (2014).

A variável área basal apresentou maiores valores nos espaçamentos mais adensados, evidenciando maior ocupação da área nestas condições. No entanto, percebe-se que quanto mais adensado o plantio, menor foi o percentual de sobrevivência em campo.

Os espaçamentos com 3, 6 e 9 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup> apresentaram valores de sobrevivência bem próximos, não se diferenciando estatisticamente. Já o espaçamento mais denso, com 1,5 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>, teve um percentual de sobrevivência muito baixo, sendo aproximadamente 20% inferior aos demais.

Quanto aos resultados alcançados pelos clones, independentemente do espaçamento de plantio utilizado, nota-se um melhor desempenho do clone 4, com maior valor de área basal e percentual de sobrevivência, seguido pelos clones 3, 2 e 1, nesta sequência.

### 5.2.2 Dados de cubagem e biomassa

Os resultados da análise de variância para dados de cubagem e biomassa aos 12 meses são apresentados na TABELA 5.7. Foi observado efeito significativo dos fatores espaçamento e clone para todas as variáveis analisadas, assim como para suas interações. Os valores médios de cada variável e a classificação segundo o teste de Tukey são apresentados na TABELA 5.8, com o fator espaçamento em função do clone nas colunas e com o clone em função do espaçamento nas linhas.

TABELA 5.7 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DE CUBAGEM E BIOMASSA AOS 12 MESES.

Fonte de Variação	Vol c/c	Vol s/c	MST
Espaçamento	155,89 **	152,99 **	510,18 **
Clone	8,95 **	9,13 **	46,39 **
Esp. x Clone	5,73 **	5,51 **	10,91 **

Vol c/c: Volume com casca; Vol s/c: Volume sem casca; MST: Matéria Seca Total; \*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%.

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.8 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 12 MESES PARA VARIÁVEIS VOLUME (COM CASCA E SEM CASCA) E MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL.

Variável	Fator	Nível	Clone			
			Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4
Vol c/c (m <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	0,00629 C a	0,00768 B a	0,00550 D b	0,00619 C ab
		3,0	0,00888 B a	0,00768 B a	0,00735 C a	0,00743 C a
		6,0	0,01374 A a	0,00871 B c	0,01137 B b	0,00963 B bc
		9,0	0,01397 A a	0,01369 A a	0,01385 A a	0,01242 A a
		DMS	0,0019			
Vol s/c (m <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	0,00518 C a	0,00629 B a	0,00451 C b	0,00504 C ab
		3,0	0,00733 B a	0,00628 B a	0,00609 C a	0,00614 C a
		6,0	0,01138 A a	0,00722 B c	0,00942 B b	0,00791 B bc
		9,0	0,01156 A a	0,01130 A a	0,01142 A a	0,01029 A a
		DMS	0,0016			
MST (kg planta <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	2,61 D b	3,80 C a	2,66 D ab	2,02 C b
		3,0	4,96 C a	4,43 BC a	4,14 C a	3,58 B a
		6,0	8,97 B a	5,48 B b	7,59 B a	4,90 B b
		9,0	10,81 A a	10,94 A a	10,24 A a	7,82 A b
		DMS	1.460			

Vol c/c: Volume com casca; Vol s/c: Volume sem casca; MST: Matéria Seca Total; Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, com maiúscula na coluna e minúscula na linha; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ).

FONTE: O autor (2014).

Percebe-se que, apesar da idade jovem, a densidade do plantio exerceu forte influência sobre o volume e a matéria seca total das árvores, acarretando num maior crescimento destas variáveis nos espaçamentos mais amplos. Quanto aos clones, observa-se um maior crescimento em volume do clone 1, exceto no espaçamento 3x0,5m (1,5 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>), no qual o clone 2 alcançou o maior valor. A maior produção de biomassa nos espaçamentos 3x0,5 e 3x3m (9 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>) foi obtida pelo clone 2 e nos demais espaçamentos pelo clone 1.

O volume individual médio, tanto com casca quanto sem, apresentado para o clone 2 nos espaçamentos 3x0,5 e 3x1m foi igual. No entanto, os volumes das árvores amostradas variaram de 0,00721 a 0,00822 m<sup>3</sup> para o primeiro espaçamento e de 0,00645 a 0,00909 m<sup>3</sup> no segundo, resultando, coincidentemente, na mesma média.

Na TABELA 5.9 são apresentados os resultados da análise de variância dos dados de cubagem aos 30 meses de idade. Foi observado efeito significativo dos fatores espaçamento e clone para todas as variáveis analisadas.

A interação entre os fatores foi significativa para as variáveis volume e largura da copa e não significativa para a variável matéria seca total individual. Desta forma, a TABELA 5.10 apresenta os valores médios das variáveis com interação significativa, tendo o fator espaçamento em função do clone nas colunas e o fator clone em função do espaçamento nas linhas, enquanto a TABELA 5.11 apresenta diretamente os resultados médios por fator, referentes à variável matéria seca total.

TABELA 5.9 – VALORES DE F (ANOVA) PARA DADOS DE CUBAGEM E BIOMASSA AOS 30 MESES.

Fonte de Variação	Vol c/c	Vol s/c	MST	Largura Copa
Espaçamento	1052,86 **	1125,26 **	289,99 **	73,64 **
Clone	83,34 **	86,29 **	9,67 **	4,35 *
Esp. x Clone	9,43 **	9,82 **	0,99 ns	2,27 *

Vol c/c: Volume com casca; Vol s/c: Volume sem casca; MST: Matéria Seca Total \*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%; ns: não significativo.

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.10 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEIS LARGURA DA COPA E VOLUME (COM CASCA E SEM CASCA).

Variável	Fator	Nível	Clone			
			Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4
Largura da Copa (m)	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	1,20 C a	1,33 C a	1,20 C a	1,43 C a
		3,0	1,57 B a	1,70 B a	1,53 B a	1,53 BC a
		6,0	2,20 A a	2,20 A a	1,87 A b	1,97 A ab
		9,0	2,03 A a	2,07 A a	1,93 A a	1,77 AB a
		DMS	0,31			
Vol c/c (m <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	0,03591 D bc	0,05286 C a	0,03393 D c	0,04228 D b
		3,0	0,05015 C c	0,05940 C a	0,05106 C bc	0,05876 C ab
		6,0	0,07841 B b	0,10835 B a	0,07000 B c	0,07486 B bc
		9,0	0,11714 A b	0,13033 A a	0,10615 A c	0,11950 A b
		DMS	0,00806			
Vol s/c (m <sup>3</sup> planta <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	0,03024 D bc	0,04448 C a	0,02828 D c	0,03498 D b
		3,0	0,04310 C b	0,05047 C a	0,04383 C ab	0,05002 C a
		6,0	0,06708 B b	0,09113 B a	0,05938 B c	0,06308 B bc
		9,0	0,09989 A b	0,11104 A a	0,08982 A c	0,10182 A b
		DMS	0,00668			

Vol c/c: Volume com casca; Vol s/c: Volume sem casca; Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, com maiúscula na coluna e minúscula na linha; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ).

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.11 – MÉDIAS E CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO TESTE DE TUKEY AOS 30 MESES PARA VARIÁVEL MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL.

Fator	Nível	Variável	
		Matéria Seca Total (kg planta <sup>-1</sup> )	
Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	15,78	C
	3,0	22,51	C
	6,0	36,61	B
	9,0	60,07	A
Clone	1	32,55	A
	2	38,35	A
	3	30,65	A
	4	33,43	A
DMS		8,90	

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ).

FONTE: O autor (2014).

Em relação à copa das árvores, variável não medida na avaliação anterior, quanto maior o espaço disponível (área por planta), maior foi o seu desenvolvimento em largura. Quanto às demais variáveis, evidencia-se um maior crescimento das variáveis individuais em espaçamentos mais amplos, independentemente do material genético utilizado.

A produção discrepante em volume obtida pelo clone 2 nos espaçamentos 3x0,5m (1,5 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>) e 3x2m (6,0 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>) (TABELA 5.10), assim como a maior produção média de matéria seca total deste clone, observada na TABELA 5.11, é justificada pela maior dimensão em diâmetro e altura das árvores amostradas, em comparação aos demais clones. No entanto, apesar de superiores à média, os valores de DAP deste clone se encontram dentro do intervalo de confiança calculado.

Quanto aos resultados em volume alcançados pelos clones nos demais espaçamentos, o clone 2 também foi o que apresentou maior desenvolvimento. Porém, as dimensões de seus indivíduos foram sempre superiores à média das subparcelas e próximas ao limite superior do intervalo de confiança nesta idade, enquanto os clones 1, 3 e 4 apresentaram resultados bem próximos à média em todos os espaçamentos. Estes clones alcançaram produções em volume bem próximas em quase todos os casos.

### 5.2.3 Discussão dos resultados

Os resultados observados indicam forte influência do espaçamento sobre as variáveis individuais e por unidade de área. De acordo com os preceitos teóricos, espaçamentos mais amplos, com maior disponibilidade de fatores produtivos do ambiente, promoveram um maior desenvolvimento individual, resultando em árvores com maiores valores de DAP, volume, biomassa e, inclusive, de altura.

Quanto à área basal, variável por unidade de área, foi observado que a redução do espaçamento foi responsável por uma maior ocupação do espaço, devido ao elevado número de indivíduos existentes. No entanto, vale ressaltar que a competição por espaço e recursos é diretamente proporcional à densidade do povoamento. Desta forma, a mortalidade causada pela competição nos plantios mais densos será maior e, ainda, ocorrerá em idades mais jovens. A estagnação do crescimento nestes povoamentos também deverá ocorrer mais cedo.

Resultados semelhantes com espécies de eucalipto, que revelaram maior crescimento individual das árvores em espaçamentos mais amplos e maior ocupação da área em espaçamentos mais densos, foram relatados ao longo dos anos por Campos *et al.* (1990), Assis *et al.* (1999), Leles *et al.* (2001), Berger *et al.* (2002), Oliveira Neto *et al.* (2003), Couto *et al.* (2004), Muller (2005), Morais (2006) e Rocha (2011), dentre outros.

## 5.3 ANÁLISE GRÁFICA

### 5.3.1 Diagrama de caixa (*Boxplot*)

O GRÁFICO 5.5, denominado diagrama de caixa ou *boxplot*, revela a dispersão dos valores de DAP e a existência ou não de valores discrepantes (*outliers*) nas idades avaliadas, para cada espaçamento. Os resultados desta análise são apresentados em números, em forma de tabela, no ANEXO I.

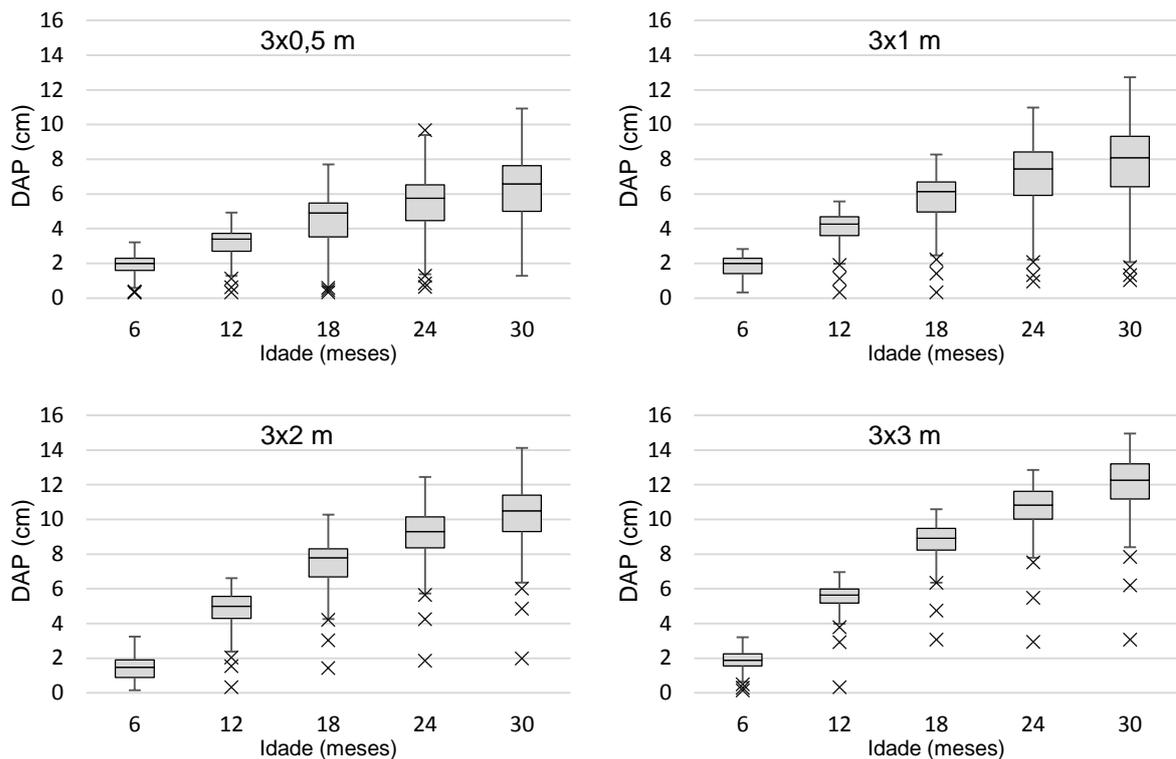


GRÁFICO 5.5 – DIAGRAMA DE CAIXA (*BOXPLOT*) PARA DADOS DE DAP NOS QUATRO ESPAÇAMENTOS TESTADOS.

FONTE: O autor (2014).

O gráfico revela um aumento no DAP das árvores avaliadas em decorrência do aumento da área disponível por planta. Nota-se também uma redução na amplitude de variação do DAP nos espaçamentos mais amplos, após a exclusão dos *outliers*.

Avaliando apenas a caixa, com 50% das observações e limitada pelo primeiro e terceiro quartil, percebe-se que em menores espaçamentos, a distribuição dos dados foi mais assimétrica, com um maior número de observações abaixo da mediana. O aumento do espaçamento entre plantas tornou esta distribuição mais simétrica, indicando também uma maior homogeneidade nesta condição.

Quanto aos dados considerados como discrepantes, praticamente todos estavam abaixo do limite inferior, sendo classificados como *outliers* inferiores. Foi encontrado apenas um *outliers* superior, no espaçamento 3x0,5m e idade 24 meses. A tendência geral observada foi uma redução na quantidade destes valores discrepantes com o passar da idade. Esta tendência só não foi observada no espaçamento 3x2m (ANEXO I).

Apesar de ser esperado um maior número de árvores dominadas em espaçamentos mais densos, nota-se que no espaçamento 3x0,5m, aos 30 meses de idade, nenhum valor foi caracterizado como *outlier* inferior. Isso ocorreu devido ao

limite inferior calculado para esta situação ter sido muito pequeno, aproximadamente 1 cm de DAP. Desta forma, árvores de pequenas dimensões e, provavelmente, dominadas não foram consideradas como discrepantes.

### **5.3.2 Distribuição diamétrica**

Os GRÁFICOS 5.6 e 5.7 apresentam as distribuições diamétricas por clone e espaçamento, em todo o período avaliado. Neles, são reveladas as frequências com que as árvores ocorreram nas classes de diâmetro, permitindo uma visão da estrutura do povoamento e sua evolução com o passar da idade.

As amplitudes ou intervalos de classes, calculadas segundo a fórmula de Sturges (Equação 4), foram de 1 centímetro para a idade 12 meses e 2 centímetros para as demais idades. No entanto, esta segunda amplitude foi utilizada para todas as idades, com o intuito de permitir uma melhor visualização e comparação dos dados.

A maior amplitude de variação do DAP em espaçamentos mais densos, assim como a maior grandeza desta variável em espaçamentos mais amplos podem ser observadas nestes gráficos. Evidencia-se também um achatamento das distribuições dos dados com o passar do tempo, ocasionado pela existência de um maior número de classes em idades mais avançadas e, conseqüentemente, um menor número de observações por classe. A mortalidade provocada pelo aumento da competição entre árvores também foi responsável pela distorção da distribuição em relação à normal, resultando em menores valores de curtose.

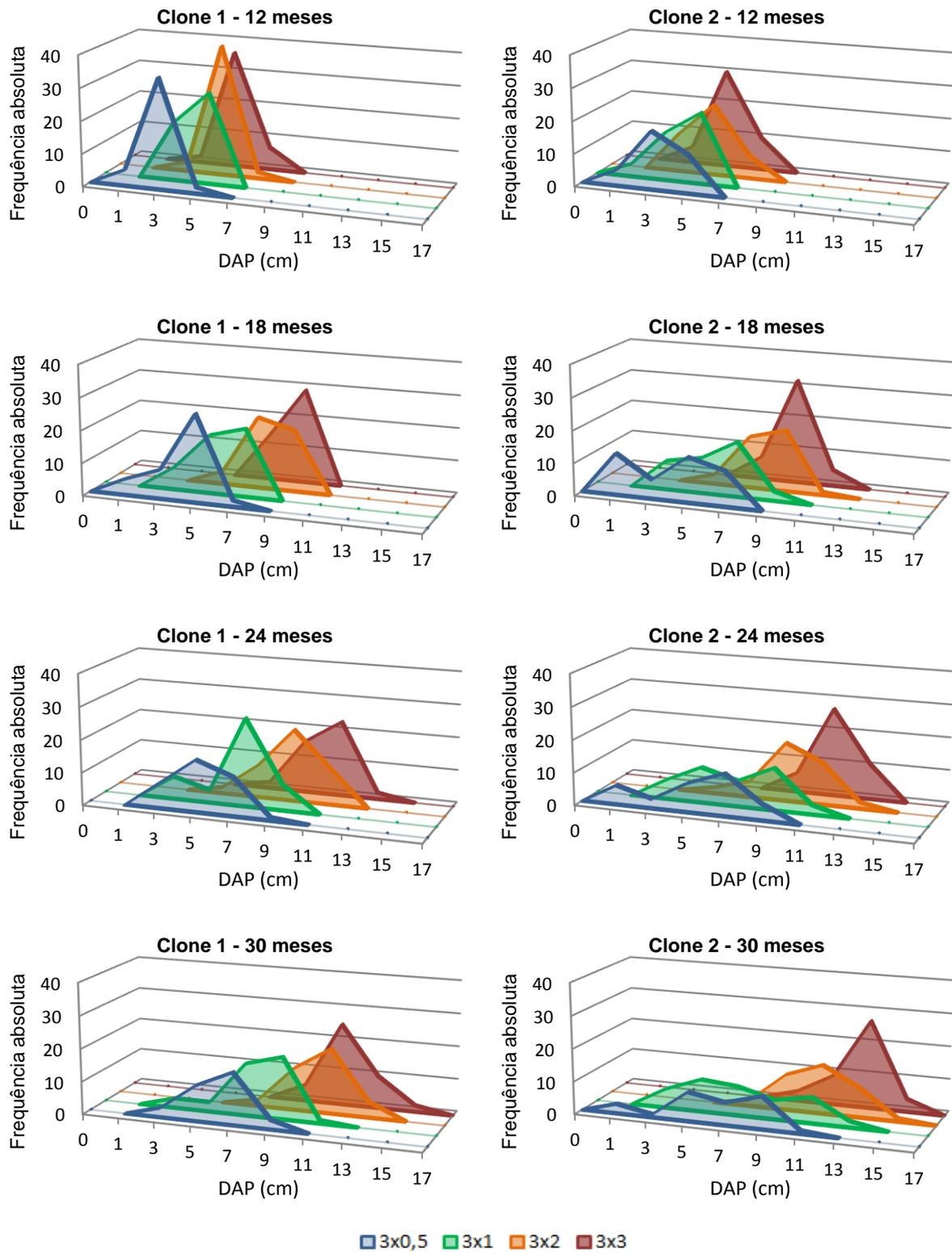


GRÁFICO 5.6 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR ESPAÇAMENTO E IDADE DOS CLONES 1 E 2.  
 FONTE: O autor (2014).

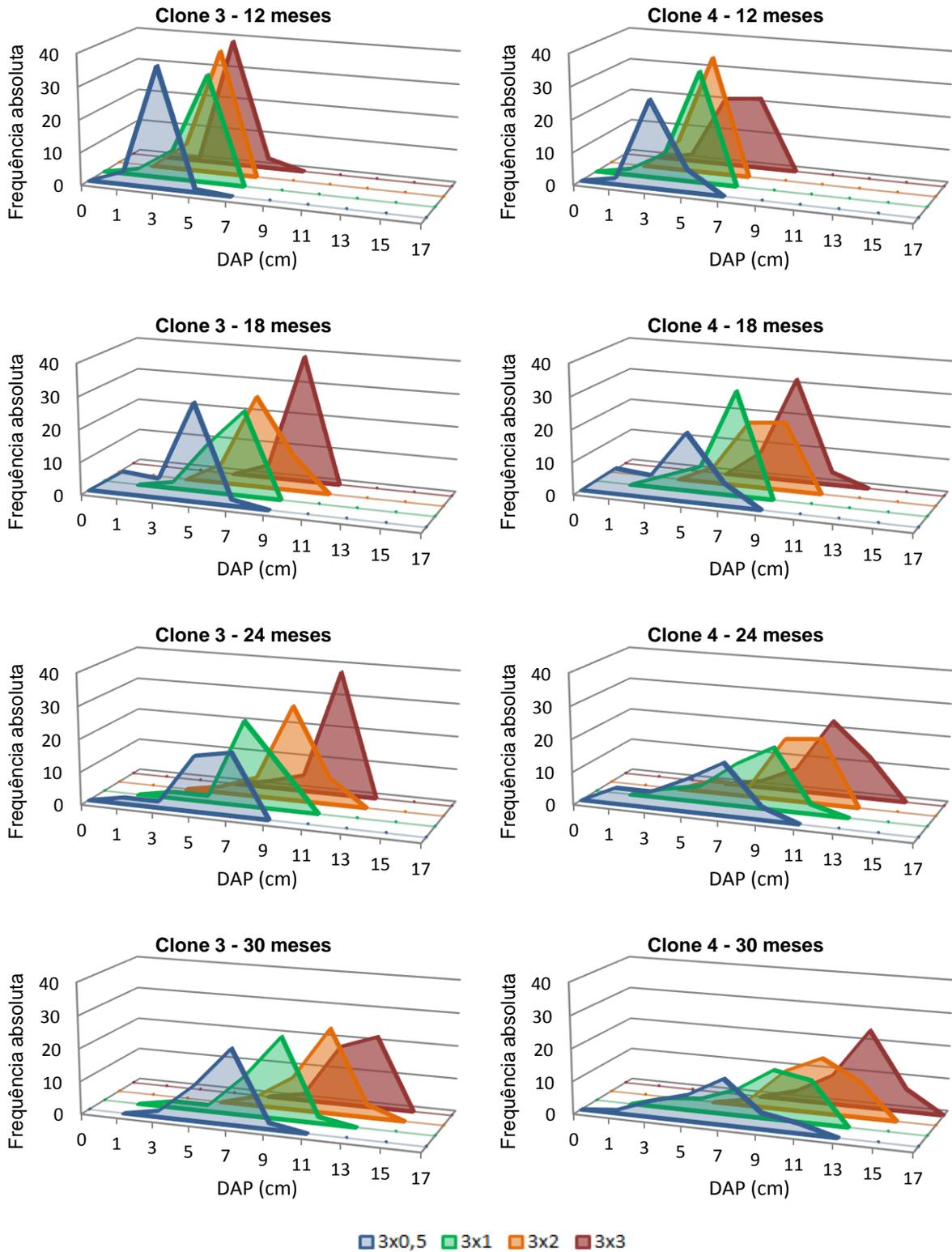


GRÁFICO 5.7 – DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR ESPAÇAMENTO E IDADE DOS CLONES 3 E 4. FONTE: O autor (2014).

No geral, espaçamentos mais amplos resultaram em distribuições mais simétricas, com menor amplitude de variação dos dados e maiores valores de DAP.

As TABELAS 5.12 e 5.13 apresentam os resultados da distribuição diamétrica traduzidos em números, com a estimativa do número de árvores por hectare em cada classe de diâmetro e total, o DAP médio, seu desvio padrão e o número total de classes, para cada idade e espaçamento. Estes valores são referentes à média dos quatro clones avaliados.

TABELA 5.12 – NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE EM CADA CLASSE DE DIÂMETRO, ESPAÇAMENTO E IDADE.

Idade	Centro de Classe (cm)	Número de árvores por hectare			
		3x0,5	3x1	3x2	3x3
12	1	1407	148	0	0
	3	4296	926	296	62
	5	815	2167	1259	778
	7	0	0	83	259
	9	0	0	0	0
	11	0	0	0	0
	13	0	0	0	0
	15	0	0	0	0
18	1	1222	0	0	0
	3	1037	407	0	0
	5	3407	963	167	0
	7	815	1778	796	204
	9	0	56	648	815
	11	0	0	9	56
	13	0	0	0	0
	15	0	0	0	0
24	1	481	0	0	0
	3	667	333	0	0
	5	1926	407	93	0
	7	2222	1370	222	37
	9	370	981	815	210
	11	0	111	481	685
	13	0	0	19	160
	15	0	0	0	0
30	1	148	0	0	0
	3	407	259	0	0
	5	1444	352	0	0
	7	2222	833	83	0
	9	741	1204	426	80
	11	148	444	722	377
	13	0	37	269	512
	15	0	0	9	80

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.13 – VALORES MÉDIOS DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA POR ESPAÇAMENTO E IDADE.

Espaçamento	Idade	N/ha	Número de classes	DAP médio	Desvio padrão
3x0,5	12	6519	3	2,82	1,26
	18	6481	4	4,18	1,96
	24	5667	5	5,47	2,67
	30	5111	5	6,35	1,96
3x1	12	3241	3	4,24	1,19
	18	3204	3	5,92	1,77
	24	3204	5	7,09	2,43
	30	3130	5	7,84	2,30
3x2	12	1639	3	4,74	1,30
	18	1620	3	7,63	1,81
	24	1630	4	9,14	2,31
	30	1509	4	10,50	1,53
3x3	12	1099	3	5,36	0,96
	18	1074	3	8,72	1,43
	24	1093	4	10,77	1,96
	30	1049	4	10,99	1,32

N/ha: Número de árvores por hectare.

FONTE: O autor (2014).

Com o avanço da idade, nota-se uma redução no número de árvores por hectare, em função da mortalidade ocorrida, aumento no número de classes e maior grandeza da variável DAP. Ao contrário do esperado, o desvio padrão foi menor aos 30 do que aos 24 meses, em todos os casos.

O aumento do número de árvores por hectare com o passar da idade, ocorrido nos espaçamentos 3x2m e 3x3m aos 18 e 24 meses, foi decorrente da inclusão de árvores bifurcadas abaixo de 1,30m nas medições, sendo estas consideradas anteriormente como apenas um indivíduo.

Quanto ao espaçamento, percebe-se que o adensamento do plantio resultou em povoamentos com um maior número de árvores por hectare, porém com menores diâmetros. O desvio padrão também foi maior nestes plantios, indicando maior variação entre indivíduos e acarretando, conseqüentemente, na divisão por um maior número de classes de diâmetro, caso seja mantida a mesma amplitude da classe.

### 5.3.3 Relação hipsométrica

O GRÁFICO 5.8 apresenta o comportamento das variáveis DAP e altura de todos os clones e espaçamentos, ao longo do período avaliado.

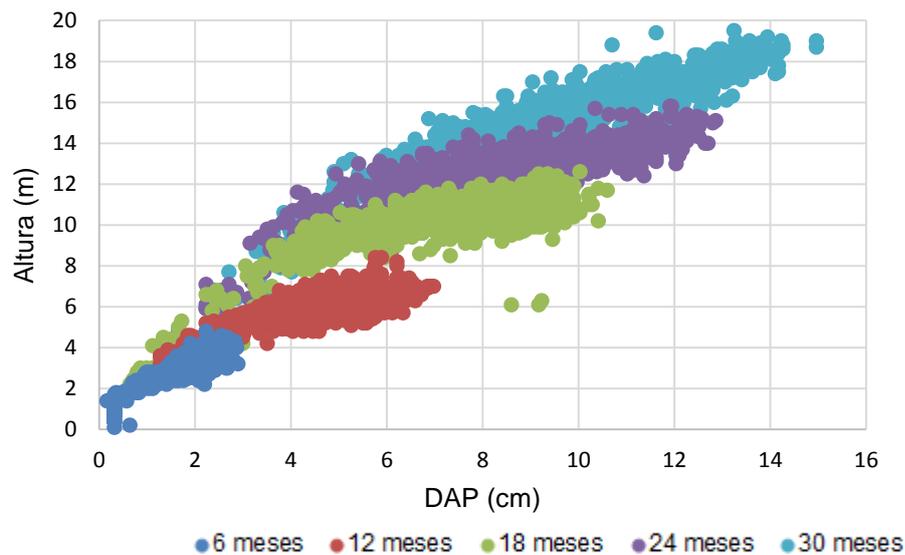


GRÁFICO 5.8 – DISPERSÃO DA ALTURA SOBRE O DAP EM DIFERENTES IDADES.  
 FONTE: O autor (2014).

É possível verificar o quanto as variáveis DAP e altura cresceram no intervalo de 6 meses entre cada medição. Este incremento sugere ser necessário o ajuste de um modelo hipsométrico para cada idade.

No entanto, além de diferentes idades, estes dados são compostos por quatro espaçamentos e quatro materiais genéticos distintos. Logo, é preciso avaliar a necessidade de se ajustar modelos para cada um destes fatores separadamente.

Os GRÁFICOS 5.9 e 5.10 apresentam o comportamento das variáveis em análise nas diferentes idades, segmentando os dados por espaçamento e clone, respectivamente. A dispersão dos dados apresentada nestes gráficos sugere que o ajuste de um só modelo hipsométrico, que envolva todos os espaçamentos e clones em uma determinada idade, pode ser suficiente. Em uma situação prática, isto pode significar um aumento da base de dados disponível para análise e uma redução de trabalho e de custos, consequentemente.

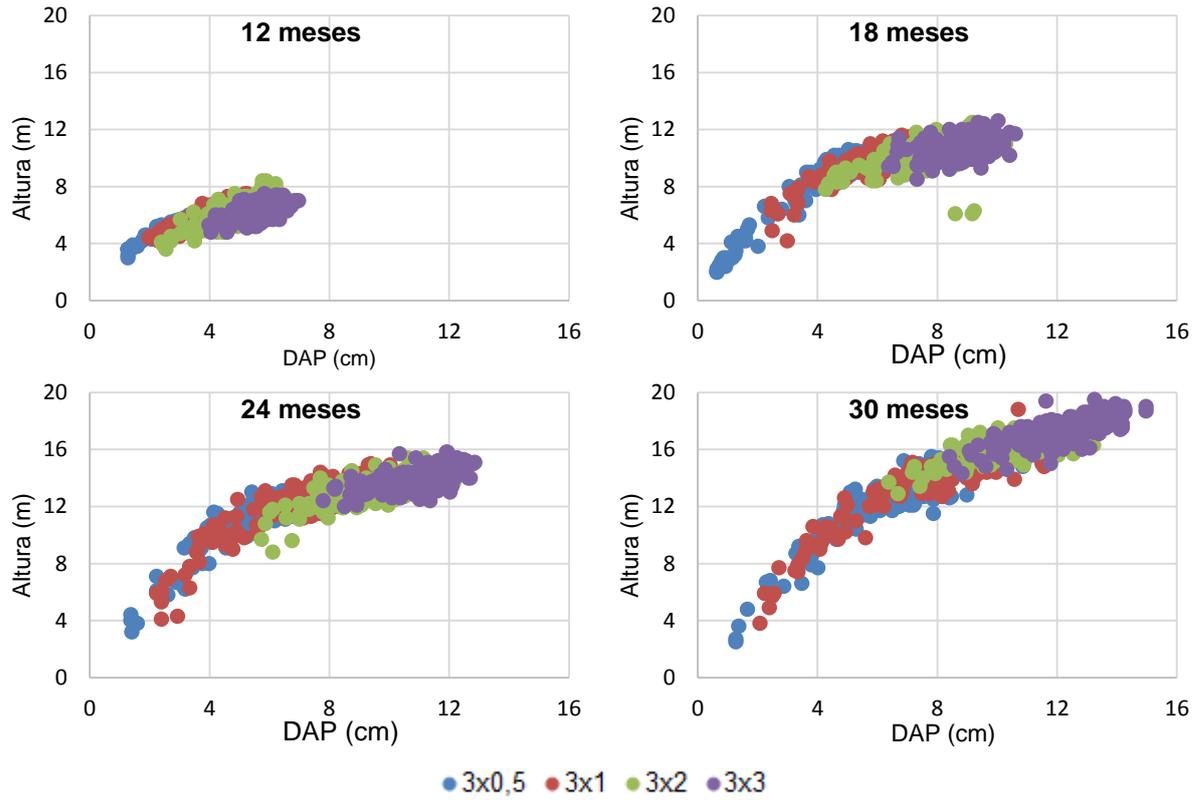


GRÁFICO 5.9 – DISPERSÃO DA ALTURA SOBRE O DAP POR ESPAÇAMENTO EM DIFERENTES IDADES.  
 FONTE: O autor (2014).

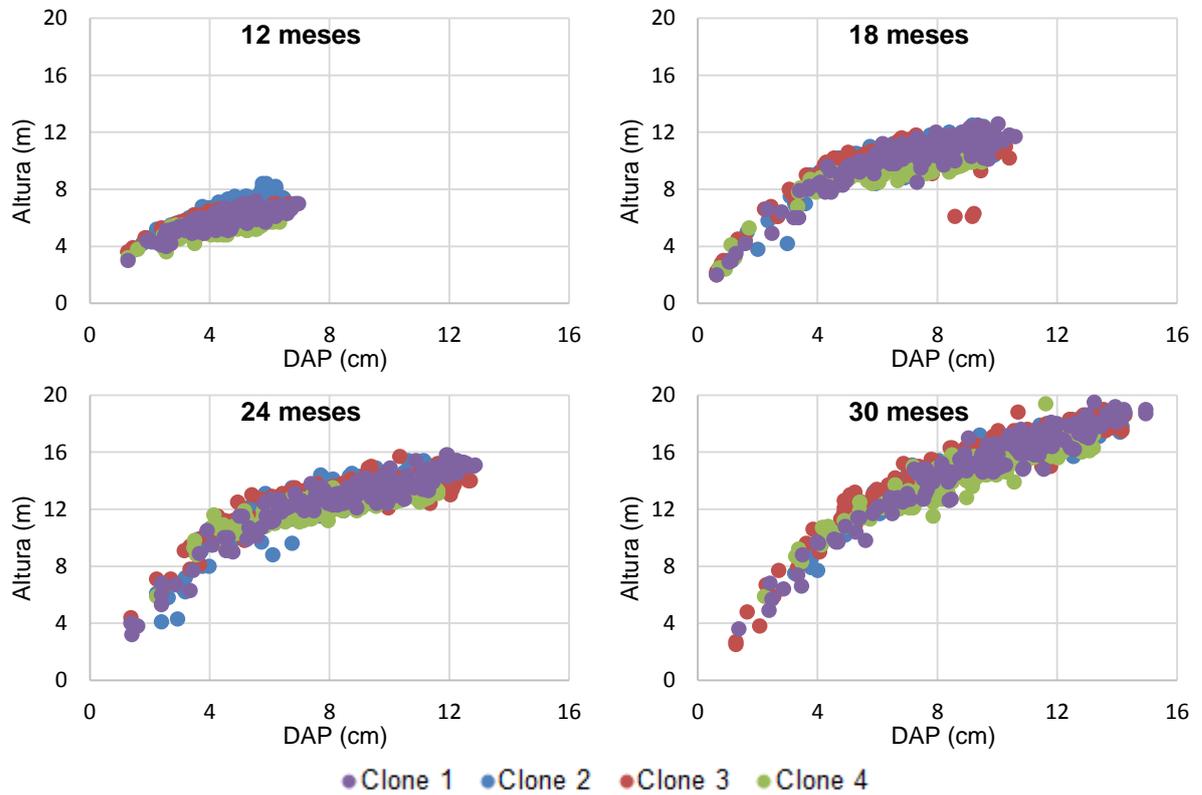


GRÁFICO 5.10 – DISPERSÃO DA ALTURA SOBRE O DAP POR CLONE EM DIFERENTES IDADES.  
 FONTE: O autor (2014).

### 5.3.4 Crescimento e Produção

O GRÁFICO 5.11 apresenta o crescimento acumulado e o incremento médio anual (IMA) das variáveis DAP, altura e área basal. Os valores se referem às médias dos valores obtidos pelos quatro clones, em cada espaçamento.

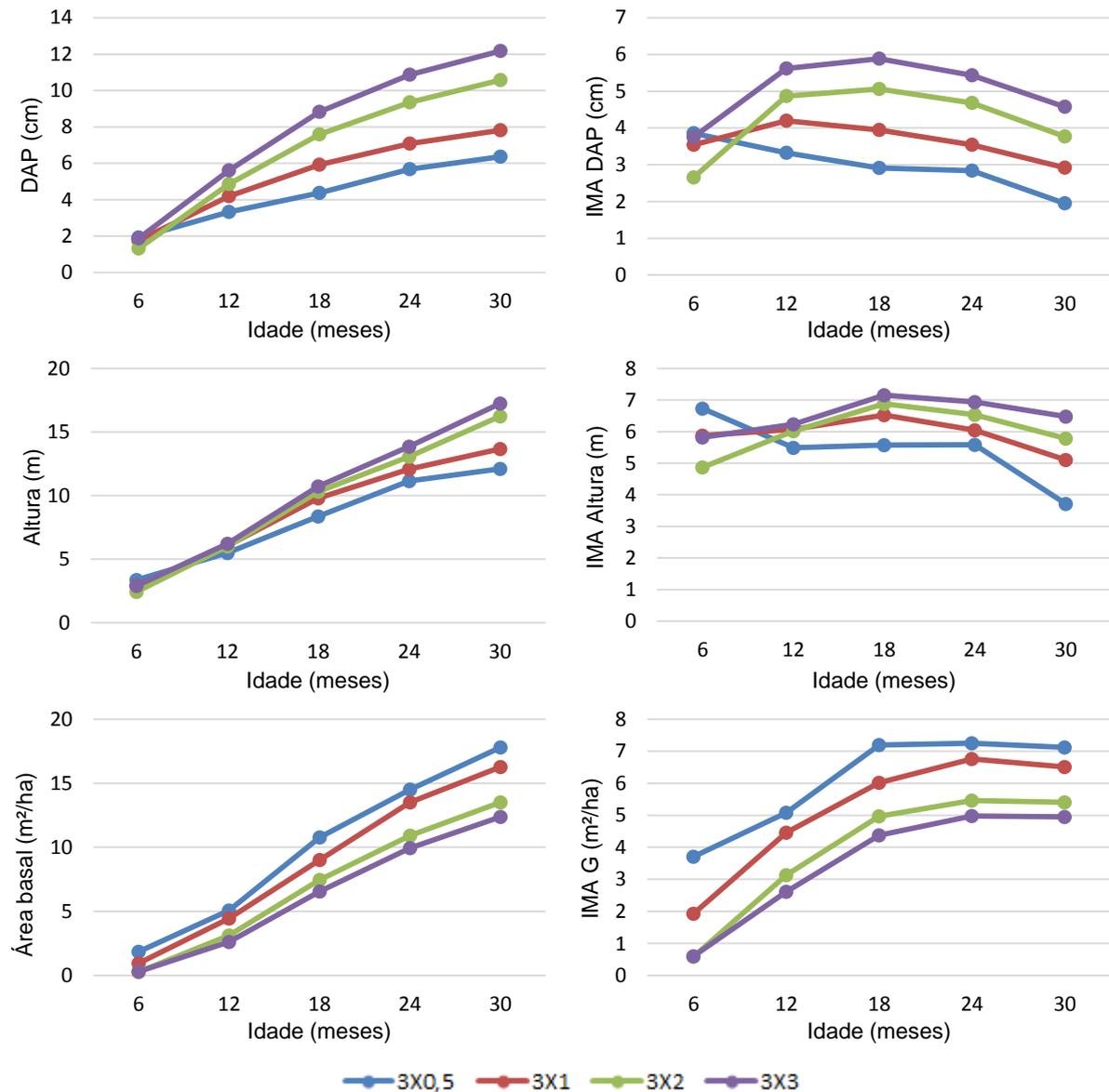


GRÁFICO 5.11 – CRESCIMENTO ACUMULADO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) DAS VARIÁVEIS DAP, ALTURA E ÁREA BASAL (G).

FONTE: O autor (2014).

O incremento médio em DAP, altura e área basal indica uma estabilização do crescimento destas variáveis em todos os espaçamentos. Evidencia-se o maior crescimento das variáveis individuais nos plantios mais amplos e a maior ocupação da

área nos plantios de maior densidade. O GRÁFICO 5.12 apresenta os valores alcançados por cada clone aos 30 meses de idade.

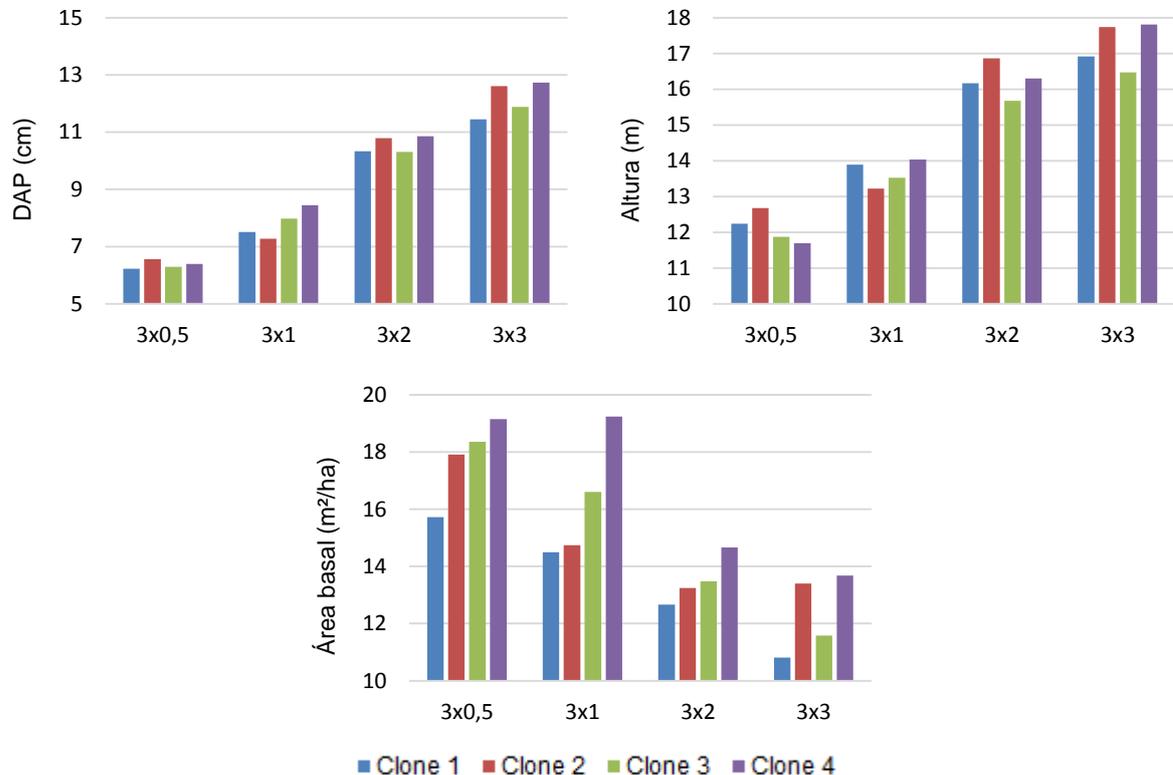


GRÁFICO 5.12 – PRODUÇÃO POR CLONE E ESPAÇAMENTO DAS VARIÁVEIS DAP, ALTURA E ÁREA BASAL AOS 30 MESES.

FONTE: O autor (2014).

Foi pequena a variação dos valores médios de DAP e altura entre os clones utilizados. No entanto, percebe-se uma leve superioridade dos clones 2 e 4 na maioria dos espaçamentos. O clone 4 também apresentou os maiores valores de área basal, enquanto o clone 1, ao contrário, apresentou os menores valores desta variável em todas as situações. Os valores de área basal do clone 3 foram superiores aos do clone 2 nos espaçamentos 3x0,5, 3x1 e 3x2m, apesar das menores dimensões de seus indivíduos, devido ao seu maior percentual de sobrevivência nestes casos.

O GRÁFICO 5.13 apresenta o crescimento acumulado e o incremento médio anual (IMA) das variáveis volume e matéria seca total, respectivamente. Os valores se referem às médias dos resultados obtidos pelos quatro clones, em cada espaçamento.

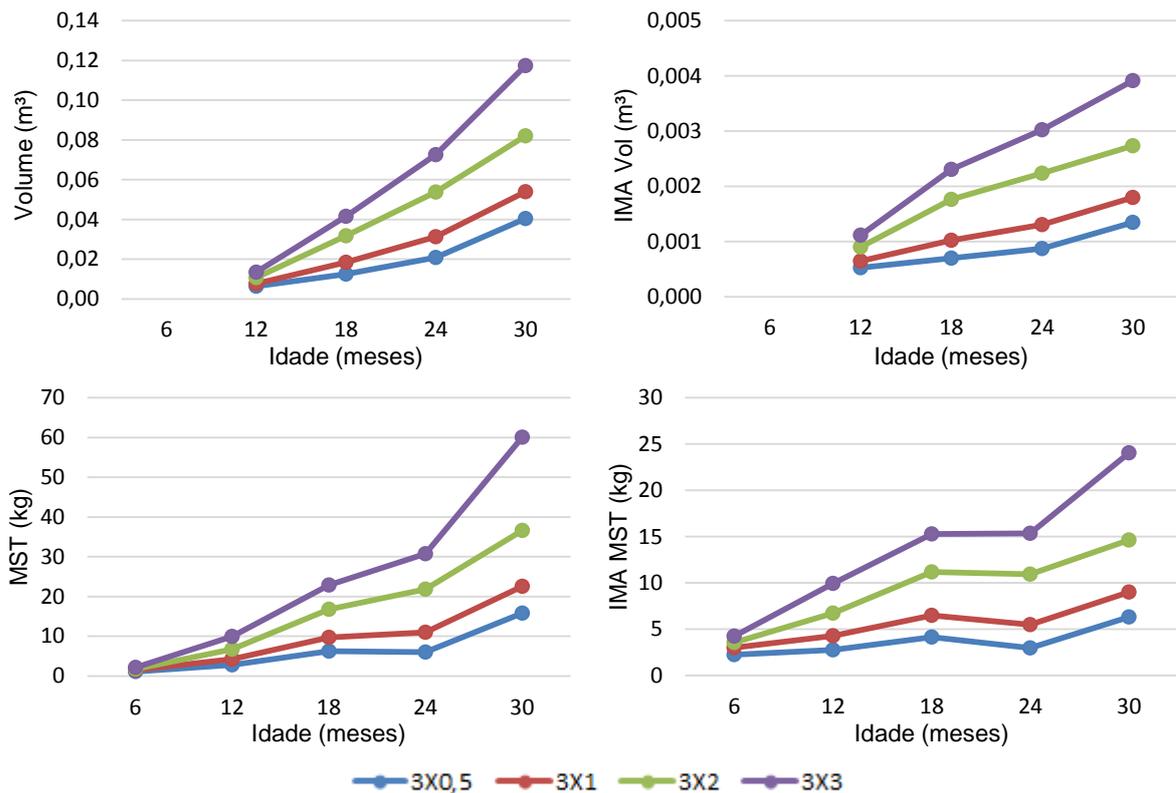


GRÁFICO 5.13 – CRESCIMENTO ACUMULADO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) DAS VARIÁVEIS VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL (MST).

FONTE: O autor (2014).

Conforme apresentado anteriormente, observa-se um maior crescimento e produção individual nos maiores espaçamentos. O incremento médio destas variáveis não revela uma estabilização do crescimento. Apesar de se tratarem de variáveis individuais, este resultado sugere que os plantios em todas as densidades avaliadas ainda não tenham atingido a idade de máxima produtividade biológica, ou a rotação ótima do ponto de vista biológico.

De acordo com as análises realizadas no item 5.1, os valores de volume e matéria seca total dos 6 aos 18 meses de idade são provavelmente superiores aos valores médios reais, em todos os espaçamentos. Isso explica a estagnação observada na produção de biomassa entre as idades 18 e 24 meses e a redução do incremento médio nesta segunda idade.

O GRÁFICO 5.14 apresenta a produção em volume e matéria seca total para cada clone, aos 30 meses de idade. Nele se observa uma maior variação entre os valores alcançados pelos clones, principalmente pelo clone 2, decorrente de seus maiores valores em DAP e altura observados anteriormente.

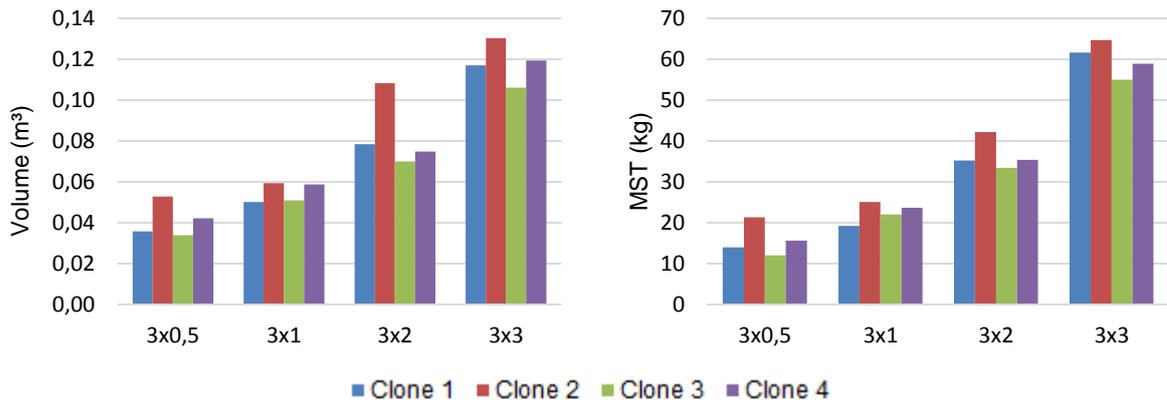


GRÁFICO 5.14 – PRODUÇÃO EM VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL (MST) POR CLONE E ESPAÇAMENTO AOS 30 MESES.

FONTE: O autor (2014).

### 5.3.4.1 Mortalidade

O GRÁFICO 5.15 revela a taxa de mortalidade em porcentagem observada nas subparcelas para cada clone e espaçamento, ao longo do período avaliado.

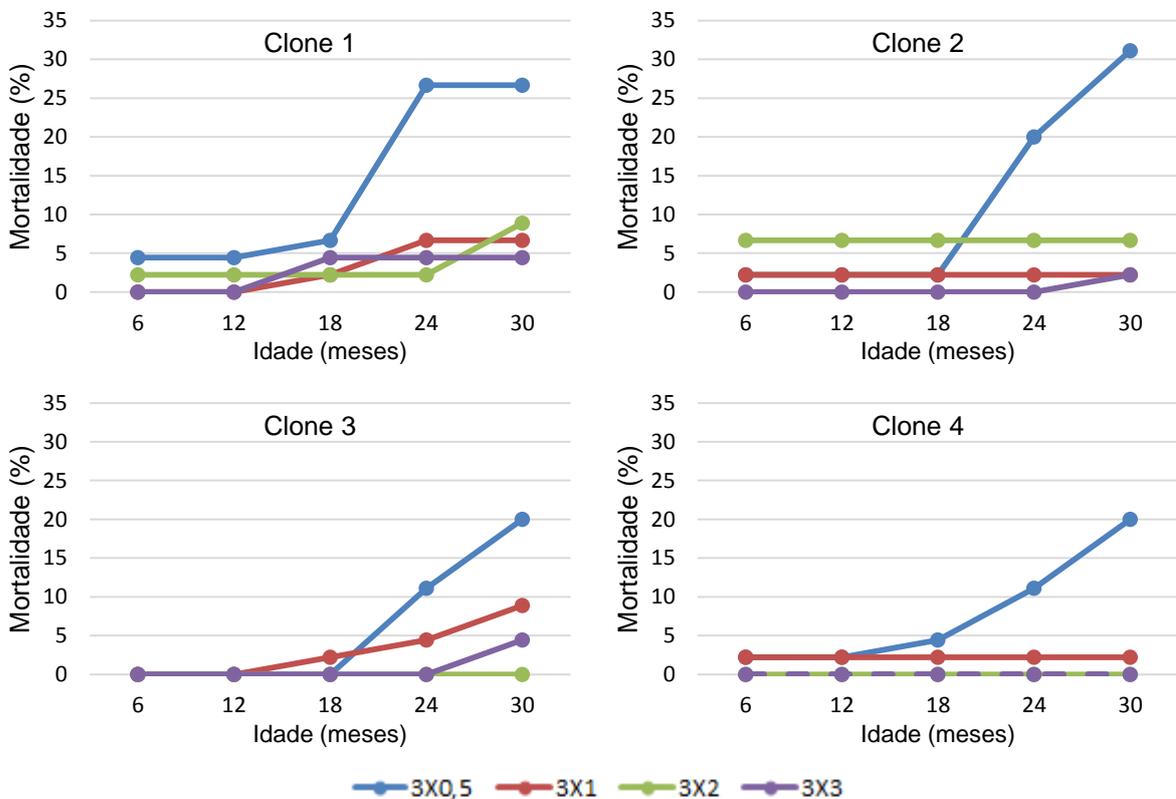


GRÁFICO 5.15 – EVOLUÇÃO DA TAXA DE MORTALIDADE POR CLONE E ESPAÇAMENTO.

FONTE: O autor (2014).

É evidente o aumento da mortalidade no campo em consequência do adensamento do plantio. Avaliando os dois extremos, teve-se um percentual médio de sobrevivência de 97,22% para o espaçamento com  $9,0 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$  (3x3m) enquanto no espaçamento com  $1,5 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$  (3x0,5m) este percentual caiu para 75,56%.

Nota-se que, a partir dos 18 meses de idade, ocorreu um aumento significativo na taxa de mortalidade de todos os clones no espaçamento 3x0,5m. Aos 30 meses, o percentual de mortalidade dos clones 1 e 2 neste espaçamento chegou aos 27 e 31%, respectivamente. Apesar de menor, a mortalidade dos clones 3 e 4 nesta idade e espaçamento também foi alta, ambas iguais à 20%.

Estes dados evidenciam a forte concorrência por recursos, tais como água, luz e nutrientes, nesta maior densidade de plantio. A taxa de mortalidade nas demais densidades variou de acordo com o clone utilizado, sendo que todos apresentaram valores abaixo dos 10%.

### **5.3.5 Discussão dos resultados**

Os gráficos apresentados ilustram e reforçam os resultados discutidos anteriormente a respeito da influência do espaçamento sobre o crescimento de um povoamento florestal.

A análise da dispersão dos valores de DAP, retratada no diagrama de caixa e nos gráficos de distribuição diamétrica, revelou uma maior uniformidade nos plantios menos densos, com menor amplitude de variação dos dados e, possivelmente, menor número de árvores dominadas.

O comportamento da taxa de mortalidade com o passar do tempo sugere que o espaçamento 3x0,5m tenha atingido seu limite de estoque entre os 24 e 30 meses de idade. A manutenção deste plantio com essa densidade sem a realização de intervenções, como desbastes ou até o corte raso, provavelmente resultará em menor retorno financeiro, visto que o capital investido na produção de mudas e no plantio será em grande parte desperdiçado.

A pequena distância entre plantas no espaçamento com  $1,5 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$ , decorrente do uso do arranjo 3x0,5m, contribuiu significativamente para a ocorrência de maior mortalidade e menor uniformidade dos plantios com essa densidade.

Diferentes arranjos, que propiciem a mesma área por planta, podem vir a ter efeitos menos negativos sobre o povoamento.

Em estudo sobre o efeito de diferentes espaçamentos e arranjos de plantio no crescimento e produção de eucaliptos até os seis anos de idade, Silva (2005) constatou uma tendência de redução da produção nos maiores arranjos (maior distância entrelinhas), além de uma menor uniformidade e maior ocorrência de quebra das árvores nestes plantios.

#### 5.4 BIOMASSA DA PARTE AÉREA

O GRÁFICO 5.16 apresenta a distribuição da biomassa aérea por componente, para cada espaçamento e idade. Os valores são referentes às médias dos quatro clones avaliados.



GRÁFICO 5.16 – DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA AÉREA EM FUNÇÃO DA IDADE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

FONTE: O autor (2014).

Nota-se que com o passar tempo ocorreu um aumento no acúmulo de biomassa no tronco. Ao final do período avaliado, a biomassa do tronco e dos galhos apresentaram valores opostos em relação aos espaçamentos. Quanto menor o espaçamento, menor foi o acúmulo de biomassa no tronco e maior o percentual de biomassa encontrado nos galhos. Já o percentual de biomassa das folhas e casca pouco diferiu entre os espaçamentos.

A TABELA 5.14 mostra a produção em toneladas por hectare dos componentes e total, aos 30 meses de idade, para cada espaçamento e clone utilizado. Os valores apresentados não levaram em consideração a mortalidade ocorrida em campo, indicando uma produção potencial desses componentes. Ainda, são extrapolações dos resultados de três indivíduos, medidos nesta idade.

Apesar do percentual de casca e folhas ser parecido entre os espaçamentos e o percentual de madeira ser maior no espaçamento mais amplo, a produção por hectare dos plantios mais densos foi superior aos demais em todos os casos.

TABELA 5.14 – PRODUÇÃO POTENCIAL DE MATÉRIA SECA DE CADA COMPONENTE E TOTAL AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE.

<b>Espaçamento</b>	<b>Clone</b>	<b>Casca (t/ha)</b>	<b>Folha (t/ha)</b>	<b>Galho (t/ha)</b>	<b>Tronco (t/ha)</b>	<b>MST (t/ha)</b>
3x0,5	1	7,3	6,2	13,3	66,8	93,6
3x1		5,3	3,7	8,9	46,3	64,2
3x2		4,4	2,9	6,2	45,3	58,8
3x3		4,7	3,3	3,3	57,2	68,5
3x0,5	2	11,3	6,6	15,1	109,4	142,4
3x1		4,7	3,8	9,4	65,8	83,7
3x2		5,2	3,4	5,9	55,8	70,3
3x3		6,0	2,9	5,0	58,2	72,1
3x0,5	3	6,2	6,5	13,2	54,4	80,3
3x1		5,2	5,3	9,8	53,1	73,4
3x2		3,6	3,5	6,1	42,6	55,8
3x3		4,7	4,0	4,1	48,4	61,2
3x0,5	4	7,6	3,9	16,7	76,4	104,6
3x1		5,7	3,4	8,6	61,2	78,9
3x2		5,1	4,0	5,5	44,4	59,0
3x3		4,7	2,4	4,0	54,4	65,5

MST: Matéria Seca Total.

FONTE: O autor (2014).

A produção discrepante em casca, madeira e matéria seca total obtida pelo clone 2 no espaçamento 3x0,5 é justificada pela maior dimensão em diâmetro e altura das árvores amostradas, em comparação aos demais clones. Nos espaçamentos 3x1,

3x2 e 3x3m, o clone 2 também foi o de maior produção em madeira, porém com valores mais próximos aos alcançados pelos outros clones.

A seguir, a TABELA 5.15 apresenta os resultados da ANOVA para as propriedades físicas e energéticas da madeira, tendo como fatores o espaçamento, o clone e a idade. Foram incluídos na tabela apenas os fatores e suas interações que tiveram efeito significativo. Em seguida, o GRÁFICO 5.17 e a TABELA 5.16 revelam o comportamento destas variáveis com o passar do tempo, com valores médios dos clones para cada espaçamento e idade.

TABELA 5.15 – RESULTADOS DA ANOVA PARA PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA.

<b>Variável</b>	<b>Fonte de Variação</b>	<b>F</b>	<b>valor-p</b>
Teor de Cinzas	Idade	125,37	5,50E-15 **
PCS	Idade	35,64	2,79E-07 **
Densidade Básica	Espaçamento	3,01	0,0394 **
	Clone	9,02	7,60E-05 **
	Idade	3,02	0,0886 *
	Esp. x Idade	2,21	0,0992 *
Densidade Energética	Espaçamento	3,94	0,0137 **
	Clone	9,80	3,73E-05 **
	Idade	26,71	4,53E-06 **
	Esp. x Idade	2,79	0,0506 *
	Clone x Idade	2,58	0,0642 *

PCS: Poder Calorífico Superior; \*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%.

FONTE: O autor (2014).

Antes da análise dos resultados, convém salientar que estas variáveis são compostas por apenas um valor, referente à uma amostra, para cada combinação de espaçamento, clone e idade, além de se tratarem de indivíduos diferentes a cada medição. Desta forma, deve-se avaliar preferencialmente a tendência dos valores e não valores pontuais.

Para as variáveis teor de cinzas e poder calorífico superior (PCS) da madeira, apenas a idade teve efeito significativo, indicando que o espaçamento de plantio e o clone utilizado não influenciaram estas variáveis, ou que a variação dentro de cada fator não foi relevante. Observa-se no GRÁFICO 5.17 que o teor de cinzas diminuiu e em determinado momento se estabilizou com o passar da idade, enquanto o PCS da madeira aumentou e também se estabilizou, independentemente do espaçamento e clone em ambos os casos.

Todos os fatores foram significativos para as variáveis densidade básica e densidade energética da madeira, além de outras interações também significativas. O GRÁFICO 5.17 e a TABELA 5.16 revelam a influência do espaçamento sobre estas variáveis, principalmente nas idades 24 e 30 meses.

A densidade básica da madeira tendeu também a aumentar com a maturidade da árvore, assim como a densidade energética, na qual seu aumento foi reflexo tanto da alteração da densidade básica, quanto do PCS com o passar da idade.

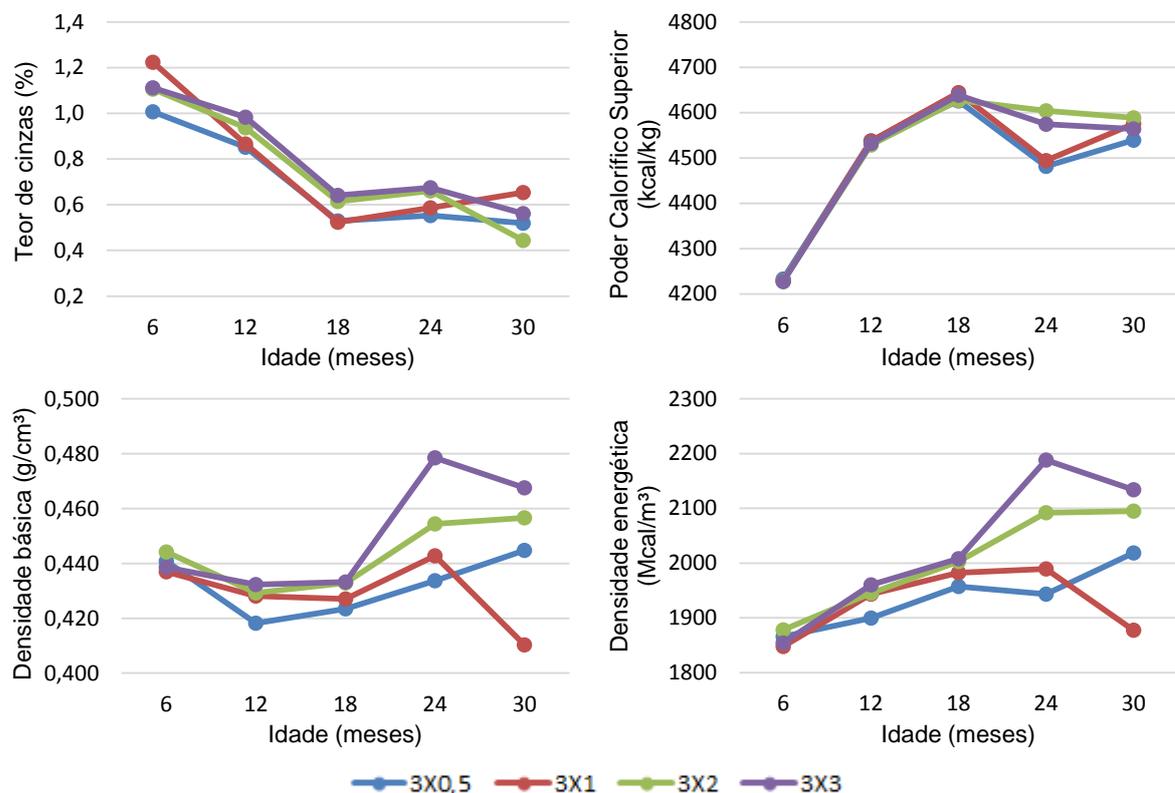


GRÁFICO 5.17 – COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA PARA CADA ESPAÇAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE.

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.16 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA POR ESPAÇAMENTO E IDADE.

Espaçamento	Idade (meses)	Cinzas (%)	Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m <sup>3</sup> )
3x0,5	6	1,01	0,441	4233	1866
3x1		1,22	0,437	4229	1848
3x2		1,11	0,444	4228	1878
3x3		1,11	0,439	4227	1854
3x0,5	12	0,85	0,418	4538	1900
3x1		0,87	0,428	4537	1944
3x2		0,94	0,429	4528	1945
3x3		0,98	0,432	4532	1960

continua

conclusão

Espaçamento	Idade (meses)	Cinzas (%)	Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m <sup>3</sup> )
3x0,5	18	0,53	0,423	4626	1957
3x1		0,52	0,427	4644	1983
3x2		0,61	0,433	4627	2003
3x3		0,64	0,433	4638	2008
3x0,5	24	0,55	0,434	4481	1943
3x1		0,59	0,443	4494	1990
3x2		0,66	0,454	4604	2092
3x3		0,67	0,478	4574	2188
3x0,5	30	0,52	0,445	4539	2019
3x1		0,65	0,410	4575	1877
3x2		0,44	0,457	4589	2095
3x3		0,56	0,468	4564	2134

FONTE: O autor (2014).

A partir dos 12 meses de idade, observa-se uma tendência de aumento da densidade básica em função do aumento do espaçamento de plantio, para valores médios dos clones utilizados. O valor médio encontrado para esta variável no espaçamento 3x1m, aos 30 meses de idade, foi inferior à todos os demais e contraria a sua própria tendência de crescimento com o passar do tempo, indicando um possível erro de determinação. Devido à pequena variação no poder calorífico superior (PCS) entre espaçamentos, a densidade energética apresentou exatamente o mesmo comportamento que a densidade básica em todas as idades.

As tabelas a seguir apresentam as propriedades físicas e energéticas da madeira (TABELA 5.17), galhos (TABELA 5.18), folhas e casca (TABELA 5.19) para cada clone e espaçamento, aos 30 meses de idade.

TABELA 5.17 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA MADEIRA AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE.

Espaçamento	Clone	Cinzas (%)	Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m <sup>3</sup> )
3x0,5	1	0,60 a	0,422 ab	4512 a	1902 ab
3x1		0,75 a	0,390 b	4617 a	1799 b
3x2		0,66 a	0,456 ab	4608 a	2101 ab
3x3		0,77 a	0,470 a	4567 a	2145 a
3x0,5	2	0,57 a	0,459 ab	4510 a	2068 ab
3x1		0,62 a	0,399 b	4519 a	1802 b
3x2		0,35 a	0,477 a	4567 a	2179 a
3x3		0,47 a	0,493 a	4550 a	2243 a

continua

						conclusão	
Espaçamento	Clone	Cinzas (%)	Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m <sup>3</sup> )		
3x0,5	3	0,32	a	0,423	a	4596	a
3x1		0,66	a	0,400	a	4572	a
3x2		0,26	a	0,454	a	4596	a
3x3		0,49	a	0,451	a	4526	a
3x0,5	4	0,59	a	0,475	a	4541	a
3x1		0,58	a	0,453	a	4593	a
3x2		0,50	a	0,440	a	4584	a
3x3		0,52	a	0,457	a	4612	a

PCS: Poder Calorífico Superior. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si.  
 FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.18 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DOS GALHOS AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE.

Espaçamento	Clone	Cinzas (%)	Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m <sup>3</sup> )
3x0,5	1	2,17	a	0,466	a
3x1		2,32	a	0,434	a
3x2		2,29	a	0,491	a
3x3		1,82	a	0,482	a
3x0,5	2	1,93	a	0,474	b
3x1		2,34	a	0,484	b
3x2		1,86	a	0,514	ab
3x3		1,77	a	0,543	a
3x0,5	3	1,86	a	0,470	a
3x1		2,05	a	0,468	a
3x2		1,92	a	0,496	a
3x3		1,96	a	0,487	a
3x0,5	4	1,97	a	0,500	a
3x1		1,82	a	0,513	a
3x2		2,23	a	0,470	a
3x3		2,22	a	0,488	a

PCS: Poder Calorífico Superior. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si.  
 FONTE: O autor (2014).

Para os clones 1, 2 e 3, o aumento do espaçamento de plantio resultou no aumento da densidade básica, exceto para o espaçamento 3x1m, que apresentou as menores densidades para estes clones. Embora esta tendência tenha sido observada, os resultados para estes clones não revelaram diferença estatística significativa entre os espaçamentos 3x0,5, 3x2 e 3x3m. A densidade básica do clone 4 não apresentou correlação com a área disponível por planta.

O poder calorífico superior (PCS) também não se correlacionou com o espaçamento de plantio e apresentou diferentes variações entre clones de acordo com o espaçamento utilizado.

Apesar da densidade energética ser determinada em função da densidade básica e do PCS, os quais apresentaram diferentes variações para cada clone e espaçamento, esta propriedade seguiu a mesma tendência que a densidade básica para todos os clones, tanto para a madeira quanto para os galhos.

Os valores encontrados para o componente galhos, referentes ao poder calorífico superior, densidade básica e densidade energética foram superiores aos encontrados para a madeira em quase todos os casos. Porém, o teor de cinzas ou minerais presente nos galhos também foi superior ao da madeira para todos os clones e espaçamentos.

TABELA 5.19 – PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS DAS FOLHAS E CASCA AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE.

Espaçamento	Clone	Folhas		Casca			
		Cinzas (%)	PCS (kcal/kg)	Cinzas (%)	Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	PCS (kcal/kg)	Densidade Energética (Mcal/m <sup>3</sup> )
3x0,5	1	4,48 a	5364 a	4,22 ab	0,275 a	4297 ab	1183 a
3x1		4,49 a	5447 a	3,58 ab	0,295 a	4316 ab	1272 a
3x2		4,84 a	5708 a	5,22 a	0,277 a	4184 b	1161 a
3x3		4,4 a	5538 a	3,25 b	0,334 a	4409 a	1473 a
3x0,5	2	3,46 ab	5328 a	4,62 ab	0,306 a	4132 b	1264 a
3x1		3,67 ab	5450 a	4,62 ab	0,347 a	4199 ab	1455 a
3x2		4,01 a	5507 a	6,04 a	0,326 a	4129 b	1345 a
3x3		3,7 b	5541 a	3,18 b	0,345 a	4335 a	1495 a
3x0,5	3	4,19 a	5344 a	4,1 b	0,286 a	4258 ab	1218 a
3x1		3,69 a	5459 a	3,68 b	0,323 a	4289 ab	1386 a
3x2		4,63 a	5478 a	6,11 a	0,28 a	4146 b	1163 a
3x3		4,48 a	5574 a	3,55 b	0,333 a	4337 a	1446 a
3x0,5	4	4,21 a	5510 a	3,4 a	0,335 a	4364 a	1464 a
3x1		4,12 a	5493 a	5,02 a	0,309 a	4239 a	1309 a
3x2		3,5 a	5321 a	3,93 a	0,308 a	4258 a	1310 a
3x3		3,71 a	5435 a	3,72 a	0,307 a	4249 a	1306 a

PCS: Poder Calorífico Superior. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si. FONTE: O autor (2014).

A casca foi o componente de menor poder calorífico para todos os clones e espaçamentos, seguido pela madeira, galhos e folhas. Ainda, este material apresentou maior teor de cinzas, chegando até 6% em alguns casos. Os altos valores de cinzas existentes na casca e nas folhas indicam uma maior concentração de nutrientes nestes componentes. Sendo assim, sua utilização implica numa maior exportação de nutrientes e na necessidade de reposição por meio de adubações.

A TABELA 5.20 apresenta os resultados da ANOVA para a biomassa produzida e energia potencial da madeira e total, tendo como fatores o espaçamento, o clone e a idade. Foram incluídos na tabela apenas os fatores e suas interações que tiveram efeito significativo.

Estas variáveis foram calculadas pelo somatório dos seus respectivos valores das três árvores amostradas, para cada espaçamento e clone, extrapolando-os para o hectare com base na área disponível para estas plantas.

TABELA 5.20 – RESULTADOS DA ANOVA PARA MATÉRIA SECA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL.

Variável	Fonte de Variação	F	valor-p
Matéria Seca Total por hectare	Espaçamento	5.687.357	< 2,2e-16 **
	Clone	202.462	1,92E-08 **
	Idade	9.983.062	< 2,2e-16 **
	Esp. x Clone	93.739	< 2,2e-16 **
Energia Potencial Madeira	Espaçamento	8,1449	3,74E-05 **
	Clone	4,9959	0,002291 **
	Idade	876,5755	< 2,2e-16 **
	Esp. x Idade	4,7857	0,003021 **
	Clone x Idade	6,1322	0,000514 **
Energia Potencial Total	Espaçamento	22,7545	2,54E-12 **
	Clone	6,1832	0,000531 **
	Idade	673,4481	< 2,2e-16 **
	Esp. x Idade	8,3315	3,5E-05 **
	Clone x Idade	4,3567	0,00558 **

\*\* Significativo à 1%.  
FONTE: O autor (2014).

Os fatores espaçamento, clone e idade foram significativos em todos os casos. Os GRÁFICOS 5.18 e 5.19 e a TABELA 5.21 revelam o comportamento da produção de matéria seca e da energia potencial em função da idade, apresentando os valores médios para cada espaçamento e idade. Incluiu-se a produção de matéria seca do tronco (madeira) para permitir a comparação entre as variáveis apresentadas.

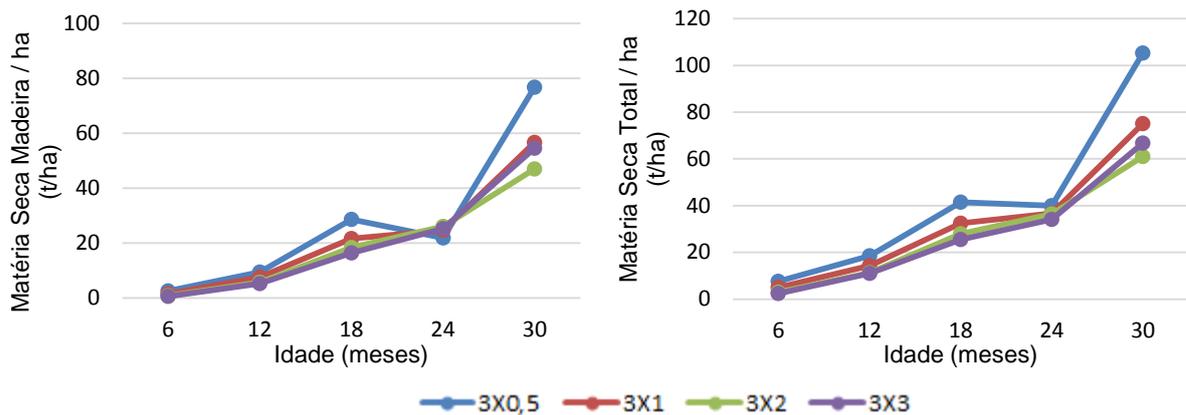


GRÁFICO 5.18 – COMPORTAMENTO DA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA MÉDIA DOS CLONES EM CADA ESPAÇAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE.

FONTE: O autor (2014).

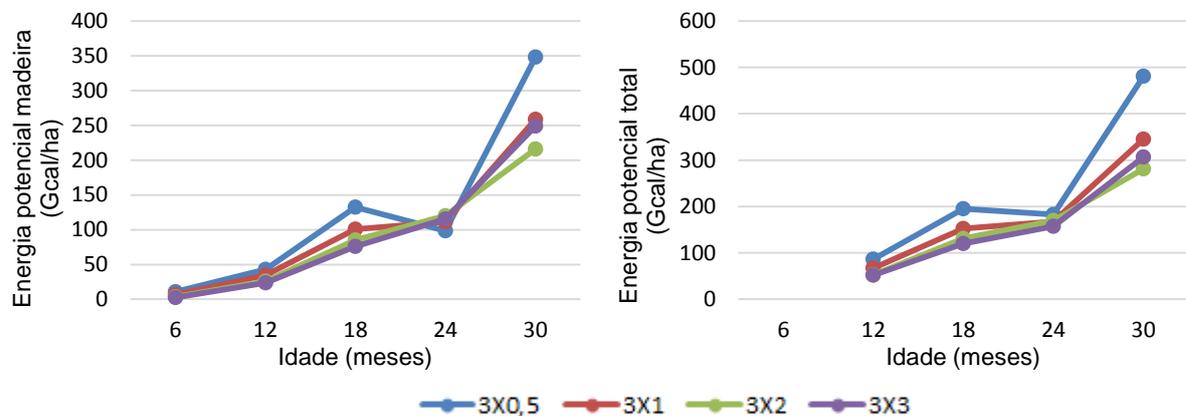


GRÁFICO 5.19 – COMPORTAMENTO DA ENERGIA POTENCIAL MÉDIA DOS CLONES EM CADA ESPAÇAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE.

FONTE: O autor (2014).

TABELA 5.21 – BIOMASSA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL POR ESPAÇAMENTO E IDADE.

Espaçamento	Idade (meses)	MS Madeira/ha (t/ha)	MS Total/ha (t/ha)	EP Madeira (Gcal/ha)	EP Total (Gcal/ha)
3x0,5	6	2,53	7,6	10,7	-
3x1		1,55	5,0	6,5	-
3x2		0,77	3,0	3,3	-
3x3		0,59	2,4	2,5	-
3x0,5	12	9,49	18,5	42,9	86,1
3x1		7,61	14,3	34,6	66,8
3x2		5,69	11,2	25,8	52,7
3x3		5,19	11,1	23,6	51,9
3x0,5	18	28,59	41,5	132,3	195,0
3x1		21,69	32,5	100,8	152,7
3x2		18,40	27,9	85,1	131,4
3x3		16,40	25,4	76,1	120,0
3x0,5	24	21,91	39,9	98,3	183,0
3x1		24,69	36,7	111,1	167,3
3x2		26,10	36,4	120,2	169,4
3x3		25,19	34,1	115,3	157,6

continua

Espaçamento	Idade (meses)	conclusão			
		MS Madeira/ha (t/ha)	MS Total/ha (t/ha)	EP Madeira (Gcal/ha)	EP Total (Gcal/ha)
3x0,5	30	76,75	105,2	347,9	481,1
3x1		56,60	75,0	258,8	345,5
3x2		47,05	61,0	215,8	281,3
3x3		54,52	66,8	248,9	306,9

MS: Matéria Seca; EP: Energia Potencial.

FONTE: O autor (2014).

Aos 6 meses de idade, foram avaliadas em laboratório apenas as propriedades físicas e energéticas da madeira, não sendo possível determinar a energia potencial total, que engloba todos os componentes da árvore. Aos 24 meses, a diferença da produção individual de matéria seca da madeira entre os espaçamentos foi tão grande que, mesmo para os valores extrapolados para o hectare, a produção permaneceu menor nos espaçamentos mais densos. Este fato não foi observado na produção de matéria seca total por hectare devido à inclusão da produção dos outros componentes da árvore.

É possível visualizar uma grande semelhança entre a biomassa produzida por hectare com o passar do tempo e a energia potencial. Com exceção da idade 24 meses, a produção por hectare de todas as variáveis analisadas foi maior nos espaçamentos mais densos.

A TABELA 5.22 apresenta os resultados da ANOVA para valores aos 30 meses de idade das variáveis matéria seca total por hectare, energia potencial da madeira e energia potencial total, tendo como fatores o espaçamento e o clone. Ambos fatores foram significativos para as três variáveis.

TABELA 5.22 – VALORES DE F (ANOVA) PARA BIOMASSA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL AOS 30 MESES.

Fonte de Variação	MST/ha	EP Madeira	EP Total
Espaçamento	49,88 **	27,13 **	47,61 **
Clone	14,96 **	16,22 **	13,48 **
Esp. x Clone	4,12 **	4,21 **	3,78 **

MST: Matéria Seca Total; EP: Energia Potencial; \*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%.

FONTE: O autor (2014).

A TABELA 5.23 traz os valores médios de biomassa produzida e energia potencial calculada, para cada clone e espaçamento aos 30 meses de idade. Na tabela, também é apresentada a classificação das médias pelo teste de Tukey. A

classificação do espaçamento de plantio foi realizada em função do clone utilizado, devido à interação significativa entre esses fatores, e vice-versa.

TABELA 5.23 – BIOMASSA PRODUZIDA E ENERGIA POTENCIAL AOS 30 MESES DE IDADE POR ESPAÇAMENTO E CLONE E CLASSIFICAÇÃO DE MÉDIAS SEGUNDO TESTE DE TUKEY.

Variável	Fator	Nível	Clone			
			Clone 1	Clone 2	Clone 3	Clone 4
MST/ha (t/ha)	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	93,63 A bc	142,41 A a	80,21 A c	104,58 A b
		3,0	64,14 B a	83,67 B a	73,45 AB a	78,94 B a
		6,0	58,81 B a	70,38 B a	55,83 B a	59,05 B a
		9,0	68,49 B a	71,89 B a	61,15 AB a	65,45 B a
		DMS	21,44			
EP Madeira (Gcal/ha)	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	301,5 A bc	493,6 A a	249,9 A c	346,8 A b
		3,0	213,6 B b	297,3 B a	243,0 A ab	281,2 AB ab
		6,0	208,9 B a	254,8 B a	195,8 A a	203,7 B a
		9,0	261,1 AB a	264,6 B a	219,0 A a	250,8 B a
		DMS	83,5			
EP Total (Gcal/ha)	Espaçamento (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> )	1,5	427,5 A bc	645,4 A a	372,2 A c	479,4 A b
		3,0	297,1 B a	381,4 B a	339,6 AB a	364,0 B a
		6,0	272,2 B a	322,7 B a	258,3 B a	272,0 B a
		9,0	315,0 B a	329,7 B a	280,5 AB a	302,6 B a
		DMS	99,2			

MST: Matéria Seca Total; EP: Energia Potencial; DMS: Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, com maiúscula na coluna e minúscula na linha.

FONTE: O autor (2014).

Para todos os clones, o espaçamento 3x0,5m (1,5 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>) foi o de melhor classificação, resultando em maior produção de biomassa e energia por hectare. A tendência observada para estas variáveis nos espaçamentos 3x0,5m, 3x1m e 3x2m foi a redução de seus valores com o aumento da área disponível por planta. Já o espaçamento 3x3m (9 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>), contrariou esta tendência e alcançou valores superiores ao espaçamento 3x2m para todos os clones e superior inclusive ao espaçamento 3x1m, para o clone 1.

Quanto aos resultados alcançados pelos clones, nota-se que no espaçamento 3x0,5m, o clone 2 apresentou maiores valores e melhor classificação para todas as variáveis. Nos demais espaçamentos, este clone também foi o de maior produção, porém apenas se diferenciou estatisticamente do clone 1, no espaçamento 3x1m. Os demais clones tiveram uma produção de biomassa e energia bem próximas em cada espaçamento, sendo estatisticamente iguais em todos os casos.

### 5.4.1 Discussão dos resultados

O aumento do espaçamento de plantio favoreceu o acúmulo de biomassa na madeira, considerando apenas a parte aérea das árvores. Deve-se avaliar também a alocação de matéria seca nas raízes, em função dos clones e espaçamentos, pois como este componente não pode ser comercializado, é preferível um maior percentual de biomassa da parte aérea.

A idade da árvore influenciou as propriedades da madeira, independentemente do espaçamento e clone utilizados, proporcionando ganhos na qualidade da madeira e aumento na produção de energia por metro cúbico e por hectare.

O ganho energético obtido com a inclusão dos componentes casca e folhas deve ser criteriosamente avaliado, em função da exportação de nutrientes que sua exploração pode acarretar.

Os resultados referentes ao poder calorífico superior (PCS) da madeira estão de acordo com diversos trabalhos que avaliam o PCS de espécies do gênero *Eucalyptus*, como Quirino *et al.* (2004), Santos *et al.* (2011) e Santos *et al.* (2012). Acredita-se que o PCS é uma característica genética de espécie, com pequena variação dentro do gênero, não sendo influenciada pelo espaçamento de plantio.

O aumento da densidade básica com o passar do tempo ocorre, segundo Vital (1984), principalmente por causa do aumento da espessura da parede celular e da diminuição da largura das células. Apesar de não se diferenciarem estatisticamente, a variação desta propriedade entre espaçamentos seguiu uma mesma tendência para a maioria das observações, indicando a possibilidade de haver uma relação diretamente proporcional entre densidade da madeira e área disponível por planta.

No entanto, segundo Vital *et al.* (2006) e Eloy *et al.* (2013), a densidade básica pode variar entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e, ainda, dentro de uma mesma árvore, em função da posição no tronco (sentido radial e longitudinal). Desta forma, a determinação da densidade a partir de amostras compostas de diferentes árvores e em diferentes posições no tronco pode vir a gerar resultados que não representem sua verdadeira variação em função da área disponível por planta.

Para que as análises a respeito do efeito do espaçamento sobre a densidade básica da madeira possam ser conclusivas, recomenda-se que sejam utilizadas amostras ponderadas das diferentes posições no tronco da árvore e que estas sejam

feitas por indivíduo. A análise química da madeira também pode auxiliar a interpretação dos resultados obtidos para esta variável.

Apesar de serem resultados que indicam produções potenciais, que não contemplam a dinâmica de crescimento de cada densidade de plantio, a relação observada entre a energia potencial e a produção de biomassa permite concluir que, para os materiais genéticos e espaçamentos de plantio avaliados, quanto maior a produção de matéria seca por hectare, maior será a produção de energia nesta mesma área, independentemente de suas propriedades. Desta forma, a escolha do melhor regime para produção de energia deve ser baseada na combinação de espaçamento e clone que maximize a produção de biomassa por hectare.

## 5.5 MODELOS DE CRESCIMENTO

### 5.5.1 Modelos tradicionais para estimativas individuais

A TABELA 5.24 apresenta os modelos volumétricos de melhor ajuste para cada espaçamento e idade, as estatísticas de precisão e os coeficientes das equações ajustadas.

TABELA 5.24 – MODELOS SELECIONADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME INDIVIDUAL.

Espaçamento	Idade	Modelo	R <sup>2</sup> <sub>ajust</sub>	IA	Syx%	b0	b1	b2
3x0,5	12	Schu-Hall lin.	-	98,89	1,91	-9,227	1,477	1,123
	18	Schu-Hall lin.	-	97,28	3,48	-9,586	1,523	1,130
	24	Schu-Hall lin.	-	97,34	2,27	-8,305	1,413	0,852
	30	Spurr	99,33	-	1,44	0,00785	0,00004	-
3x1	12	Schu-Hall lin.	-	98,04	1,91	-9,201	1,962	0,746
	18	Schu-Hall lin.	-	96,11	3,11	-8,905	2,216	0,325
	24	Schu-Hall lin.	-	99,43	1,13	-8,421	1,567	0,777
	30	Schu-Hall lin.	-	98,68	1,27	-9,126	1,384	1,200
3x2	12	Spurr	98,50	-	2,18	0,00077	0,00005	-
	18	Spurr	77,05	-	5,20	0,00176	0,00004	-
	24	Schu-Hall lin.	-	92,69	2,69	-8,369	1,403	0,908
	30	Schu-Hall lin.	-	97,82	3,17	-9,844	1,410	1,449
3x3	12	Schu-Hall lin.	-	67,48	4,90	-9,860	2,093	0,928
	18	Schu-Hall lin.	-	91,64	3,72	-9,292	1,463	1,138
	24	Schu-Hall lin.	-	94,68	3,70	-8,502	1,884	0,550
	30	Schu-Hall lin.	-	85,29	3,48	-7,304	1,009	0,918

Schu-Hall lin.: Schumacher e Hall linearizado.

FONTE: O autor (2014).

Os modelos selecionados para ajuste apresentaram, em sua maioria, alto coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ), ou seu equivalente Índice de ajuste de Schlaegel (IA), e baixo erro padrão da estimativa (Syx%). Nota-se que os dados dos espaçamentos mais adensados (3x0,5 e 3x1m) foram os que propiciaram os melhores ajustes.

Pela análise gráfica dos resíduos (GRÁFICO 5.20), observou-se que todos os modelos apresentaram boa distribuição ao longo dos valores estimados e não se mostraram tendenciosos. Nota-se que praticamente todos os resíduos se concentram na faixa de  $\pm 10\%$ .

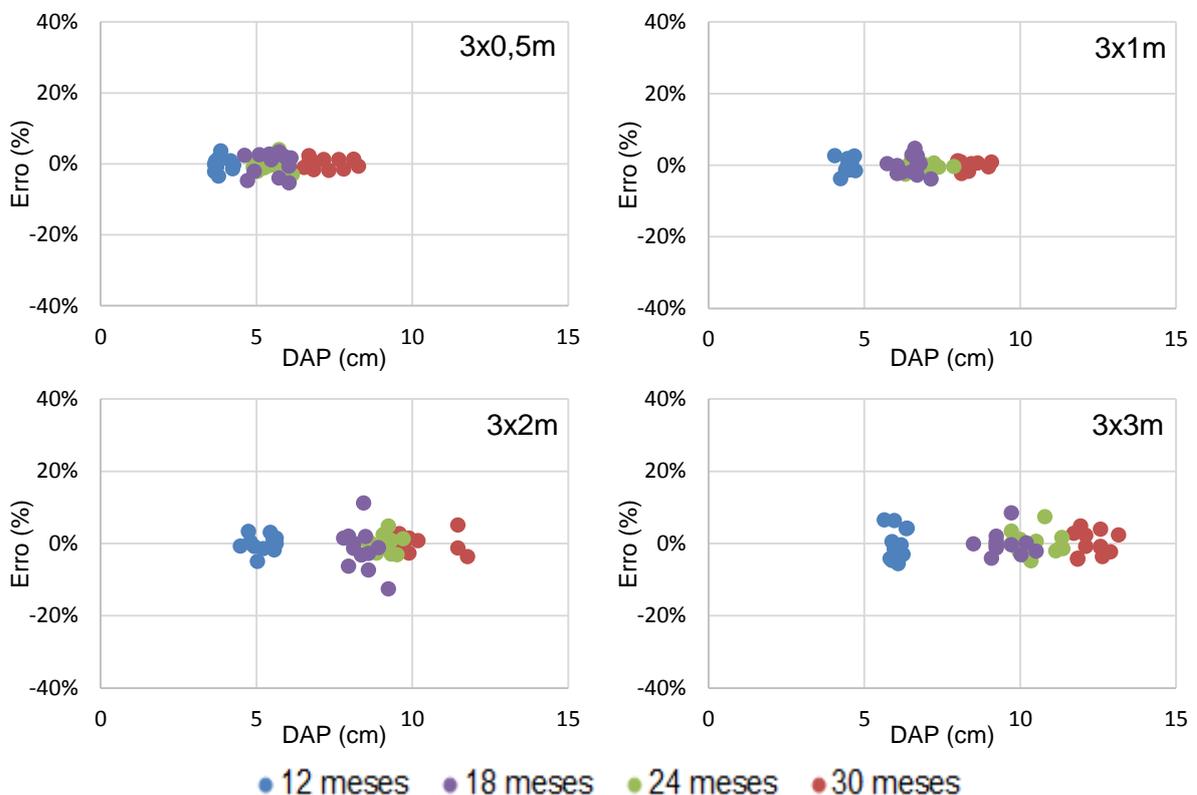


GRÁFICO 5.20 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DO DAP NA ESTIMATIVA DO VOLUME PARA CADA ESPAÇAMENTO E IDADE.

FONTE: O autor (2014).

A TABELA 5.25 apresenta os modelos selecionados para estimativa da matéria seca total individual para cada espaçamento e idade, as estatísticas de precisão e os coeficientes das equações ajustadas.

TABELA 5.25 – MODELOS SELECIONADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL.

Clone	Idade	Modelo	R <sup>2</sup> <sub>ajust</sub>	IA	Syx%	b0	b1	b2
1	6	Schu-Hall lin.	-	69,53	21,58	5,76084	2,68799	-1,15029
	12	Schu-Hall lin.	-	97,45	8,921	3,14644	3,06634	0,34718
	18	Schu-Hall lin.	-	99,69	3,279	4,55691	2,27893	0,17983
	24	Schu-Hall	97,9	-	7,151	3646,79	2,64476	-1,53040
	30	Schu-Hall lin.	-	95,97	13,36	3,46239	2,53308	0,44279
2	6	Schu-Hall lin.	-	84,66	17,12	5,39094	1,99420	-0,25738
	12	Schu-Hall lin.	-	99,19	4,890	3,16234	2,93904	0,43436
	18	Schu-Hall lin.	-	99,47	3,895	2,57307	1,96030	1,21574
	24	Schu-Hall lin.	-	99,81	2,639	5,02205	2,41311	-0,16712
	30	Schu-Hall lin.	-	92,85	14,10	0,69795	1,39043	2,31209
3	6	Schu-Hall lin.	-	85,85	10,91	5,67157	2,66917	-1,31232
	12	Schu-Hall lin.	-	99,70	3,056	4,19699	2,62025	0,12297
	18	Schu-Hall lin.	-	99,34	4,486	4,02658	2,26160	0,38284
	24	Schu-Hall	99,55	-	3,436	295,192	2,34356	-0,35957
	30	Schu-Hall	96,28	-	10,16	0,02069	0,71010	4,63306
4	6	Schu-Hall lin.	-	75,33	17,92	4,47946	2,18716	0,09977
	12	Schu-Hall lin.	-	99,21	4,874	3,97758	2,86885	-0,04226
	18	Schu-Hall lin.	-	85,60	19,70	3,47226	2,01537	0,76528
	24	Schu-Hall	98,97	-	6,332	24361,0	3,70045	-3,24230
	30	Schu-Hall lin.	-	96,04	11,38	-1,09134	1,35512	3,02988

Schu-Hall: Schumacher e Hall; Schu-Hall lin.: Schumacher e Hall linearizado.

FONTE: O autor (2014).

As estatísticas de precisão do ajuste indicam que a correlação do peso seco com o diâmetro e a altura não é tão forte, como a correlação entre o volume e estas variáveis. Percebe-se pelas estatísticas, assim como a análise gráfica da dispersão dos resíduos, apresentada no GRÁFICO 5.21, que as piores estimativas ocorreram para a idade 6 meses, para todos os clones.

Apesar dos modelos para estimativa da matéria seca total individual não terem apresentado resultados tão expressivos quanto os obtidos na estimativa do volume individual, os ajustes foram considerados satisfatórios. Procedeu-se, então, para a estimativa do volume e matéria seca de todos os indivíduos presentes nas subparcelas.

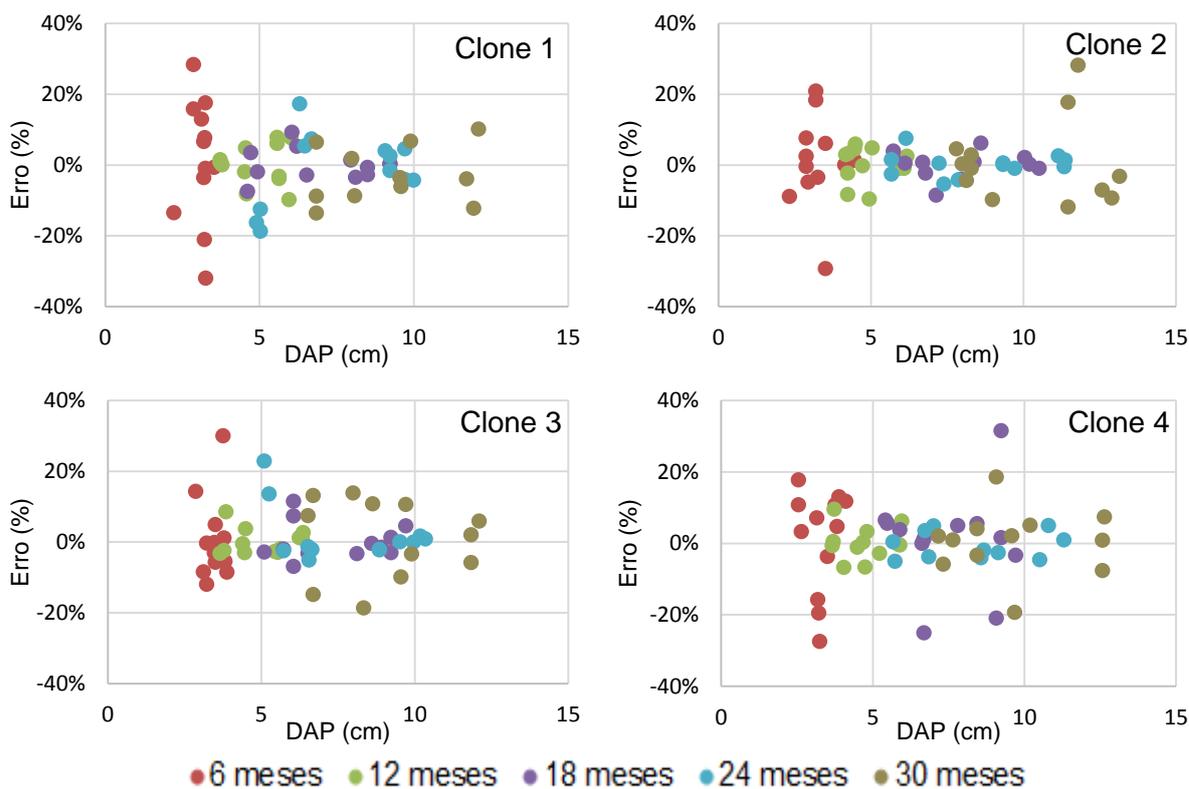


GRÁFICO 5.21 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DO DAP NA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL PARA CADA CLONE E IDADE.

FONTE: O autor (2014).

Os GRÁFICOS 5.22 e 5.23 apresentam a dispersão do volume e matéria seca individuais, estimados pelos modelos, das árvores das subparcelas em função do seu diâmetro e em diferentes idades.

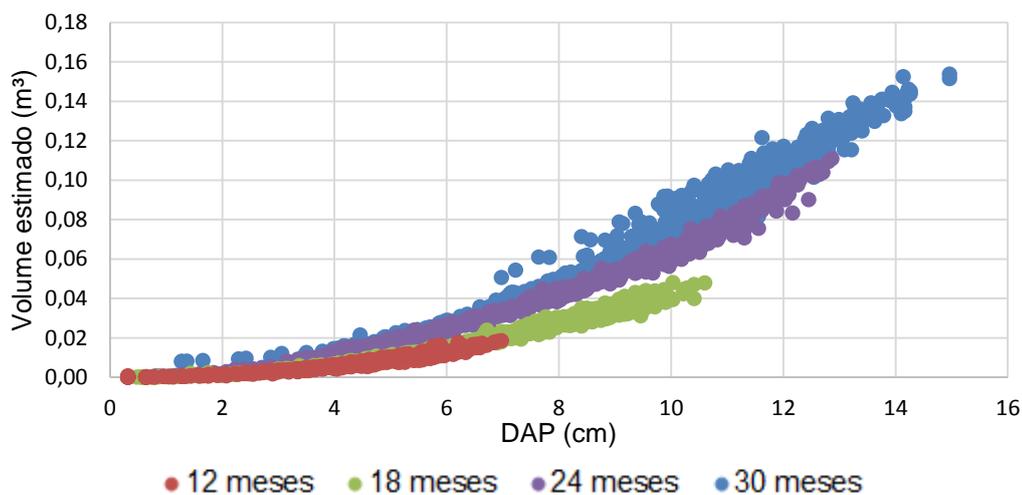


GRÁFICO 5.22 – VOLUME INDIVIDUAL ESTIMADO EM FUNÇÃO DO DAP PARA CADA IDADE.

FONTE: O autor (2014).

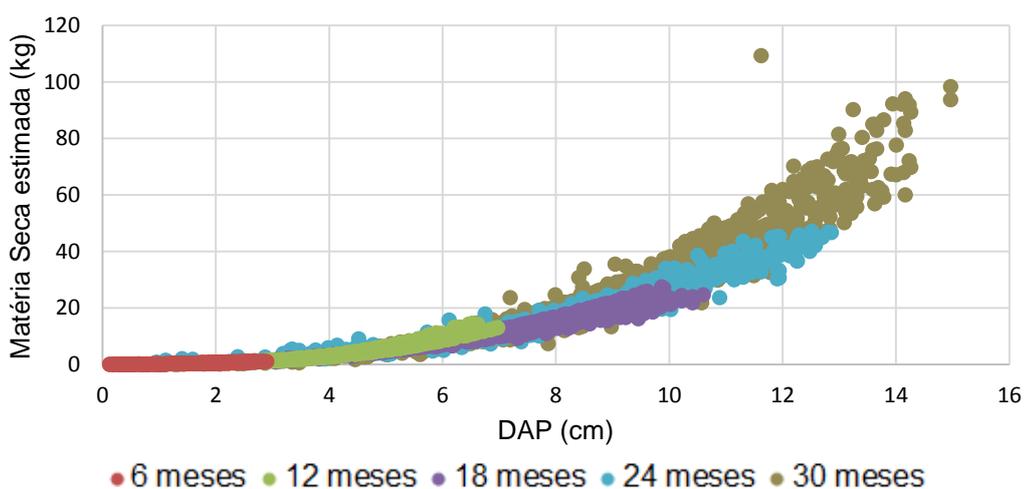


GRÁFICO 5.23 – MATÉRIA SECA TOTAL INDIVIDUAL ESTIMADA EM FUNÇÃO DO DAP PARA CADA IDADE.

FONTE: O autor (2014).

Foram somados o volume e a matéria seca total de todas as árvores de cada subparcela e, em seguida, estes valores foram extrapolados para o hectare. A TABELA 5.26 a seguir apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) destas variáveis aos 30 meses de idade, tendo como fatores o espaçamento e o clone.

TABELA 5.26 – RESULTADOS DA ANOVA PARA VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE AOS 30 MESES DE IDADE.

Variável	Fonte de Variação	F	valor-p
Vol/ha (m <sup>3</sup> /ha)	Espaçamento	29,151	2,81E-09 **
	Clone	8,8193	0,000209 **
MST/ha (t/ha)	Espaçamento	2,8872	0,050751 *
	Clone	7,0645	0,000894 **
	Esp. x Clone	2,7040	0,018319 **

Vol: Volume; MST: Matéria Seca Total; \*\* Significativo à 1%; \* Significativo à 5%.

FONTE: O autor (2014).

Ambos fatores foram significativos. No entanto, percebe-se que o espaçamento de plantio teve maior efeito sobre a produção em volume do que sobre a produção de matéria seca total.

A TABELA 5.27 revela os valores médios de volume e matéria seca total por hectare, das três subparcelas, para cada espaçamento, clone e idade. Para a idade de 30 meses, é apresentada a classificação das médias segundo o teste de Tukey, com significância de 5%.

TABELA 5.27 – VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL MÉDIOS ESTIMADOS PELOS MODELOS SELECIONADOS.

Espaçamento	Clone	Volume (m <sup>3</sup> /ha)				Matéria Seca Total (t/ha)					
		12m	18m	24m	30m	12m	18m	24m	30m		
3x0,5	1	23,8	52,7	114,8	152,0	a	10,4	27,9	43,6	55,7	a
3x1		22,8	46,8	105,0	138,0	ab	12,4	26,1	41,2	59,1	a
3x2		18,1	43,3	90,6	123,0	ab	11,8	25,7	39,7	63,1	a
3x3		12,4	34,6	72,6	111,0	b	9,3	20,7	33,2	57,7	a
3x0,5	2	23,8	56,8	130,3	180,1	a	12,0	27,9	40,6	63,1	a
3x1		18,3	45,7	103,6	136,8	b	10,6	22,1	36,3	52,9	a
3x2		13,4	36,8	85,9	133,8	b	8,0	18,3	34,9	55,9	a
3x3		11,2	38,3	89,7	130,0	b	8,8	19,7	36,0	56,9	a
3x0,5	3	22,6	54,1	135,0	165,2	a	11,4	28,0	44,2	45,6	a
3x1		20,4	48,2	111,7	145,4	ab	12,0	24,7	41,8	57,5	a
3x2		12,9	36,5	84,5	125,7	ab	8,6	20,9	34,9	61,8	a
3x3		9,7	32,8	78,7	112,0	b	7,6	19,6	32,3	55,7	a
3x0,5	4	22,6	55,8	136,4	180,6	a	10,0	26,5	41,9	54,6	b
3x1		23,8	56,9	131,3	174,7	ab	11,8	26	44,6	74,3	a
3x2		14,1	42,7	95,1	141,3	ab	8,2	20,1	42,0	65,4	ab
3x3		12,8	38,8	94,3	135,0	b	8,7	18,7	36,5	71,8	ab
3x0,5	Média	23,2	54,8	129,1	169,5	a	11,0	27,6	42,6	54,7	a
3x1		21,3	49,4	112,9	148,7	ab	11,7	24,7	41,0	61,0	a
3x2		14,6	39,8	89,0	130,9	ab	9,2	21,3	37,9	61,6	a
3x3		11,5	36,2	83,8	122,0	b	8,6	19,7	34,5	60,5	a

Diferença Mínima Significativa ( $P=0,05$ ): Vol/ha: 40,9; MST/ha: 19,7.

FONTE: O autor (2014).

Em relação ao espaçamento, a produção em volume por hectare se comportou de acordo com a tendência esperada, de maior produção por unidade de área em espaçamentos mais densos, para praticamente todos os clones e idades. Já a produção de matéria seca total por hectare não apresentou uma tendência tão bem definida quanto ao efeito do espaçamento, principalmente aos 30 meses de idade. Nesta idade, a produção média de matéria seca por hectare do espaçamento 3x0,5m foi inferior à de todas as demais densidades, que, por sua vez, apresentaram resultados bem próximos. A diferença entre os valores médios de todos os espaçamentos não foi significativa estatisticamente.

Quanto aos clones, o clone 4 foi o que obteve a maior produção volumétrica por hectare aos 30 meses em todas as densidades de plantio, seguido pelo clone 2. O clone 1 foi o de menor produção em volume por hectare ao final do período avaliado.

Na produção de matéria seca, o clone 4 também foi superior aos demais, exceto no espaçamento 3x0,5m, no qual o clone 2 foi o que alcançou maior produção.

Este mesmo clone (2) não apresentou grande produção de matéria seca nos demais espaçamentos, apesar da sua maior produção em volume. Os clones 1 e 3 apresentaram resultados bem próximos na maioria dos casos.

### 5.5.2 Modelagem global

A TABELA 5.28 apresenta as estatísticas de precisão do ajuste do modelo de Clutter na estimativa da área basal, para cada espaçamento. Todos os ajustes resultaram em altos valores do Índice de ajuste de Schlaegel (IA) e baixo erro padrão da estimativa (Syx%).

TABELA 5.28 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA ÁREA BASAL.

Espaçamento	IA	Syx	Syx%	b1	b2
3x0,5	95,99%	0,665	4,62	2,543	0,018
3x1	97,93%	0,507	3,92	2,497	0,019
3x2	95,92%	0,549	5,18	2,820	0,015
3x3	96,35%	0,501	5,14	2,082	0,031

FONTE: O autor (2014).

O GRÁFICO 5.24 mostra a dispersão dos resíduos em função da área basal e do incremento médio anual em volume aos 30 meses, variável utilizada como indicadora da capacidade produtiva do local. A maioria dos resíduos se situou na faixa de  $\pm 10\%$ , para todos os espaçamentos, com boa distribuição e sem tendências.

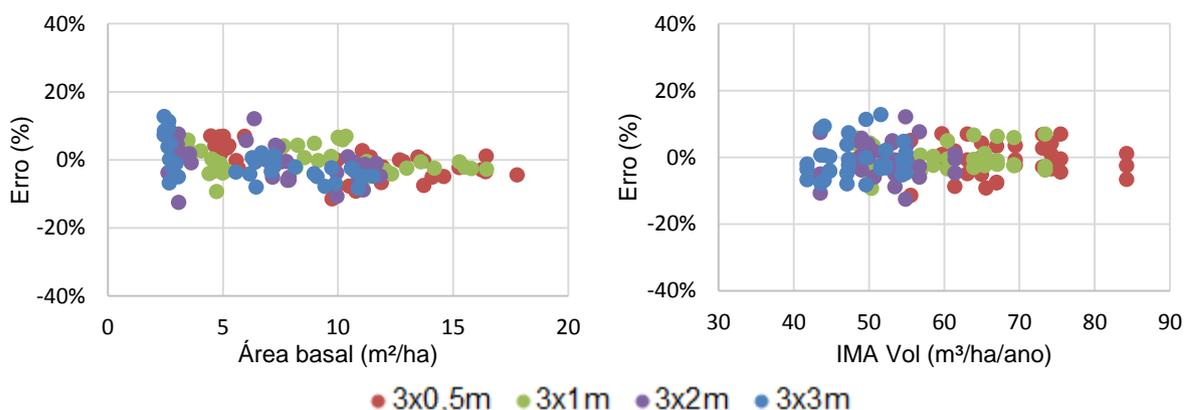


GRÁFICO 5.24 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DA ÁREA BASAL (G) PARA CADA ESPAÇAMENTO

FONTE: O autor (2014).

A TABELA 5.29 apresenta as estatísticas de precisão do ajuste do modelo de Clutter na estimativa do volume por hectare, para cada espaçamento. Nota-se que quanto maior o espaçamento de plantio, melhores foram os ajustes, com maiores valores de IA e baixo Syx%.

TABELA 5.29 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DO VOLUME POR HECTARE.

Espaçamento	IA	Syx	Syx%	b0	b1	b2	b3
3x0,5	97,11%	11,807	12,54	5,625	-3,324	0,011	0,028
3x1	98,15%	8,469	5,69	2,170	-0,799	-0,002	1,158
3x2	98,23%	8,118	6,20	2,587	-1,271	0,003	0,973
3x3	99,30%	5,210	4,27	4,675	-3,184	0,012	0,304

FONTE: O autor (2014).

O GRÁFICO 5.25 mostra a dispersão dos resíduos em função da área basal, do incremento médio anual aos 30 meses e do DAP. Observa-se que uma parte dos resíduos se concentram na faixa de -10 a -30%, para valores de área basal entre 5 e 15 m<sup>2</sup>/ha. Todo este grupo de resíduos, que também pode ser observado em função do IMA e do DAP, é proveniente das estimativas do volume por hectare aos 18 meses de idade. Este grupo teve seus valores superestimados em função da maior taxa de crescimento ocorrida logo após essa idade.

O GRÁFICO 5.26, que revela a dispersão dos volumes observados, sua tendência linear de crescimento e a projeção do volume para idades futuras, para cada espaçamento, auxilia a interpretação da distribuição gráfica dos resíduos. Nele, observa-se que a maioria dos valores aos 18 meses de idade estão abaixo da linha que representa a tendência de crescimento, sendo então superestimados pelo modelo.

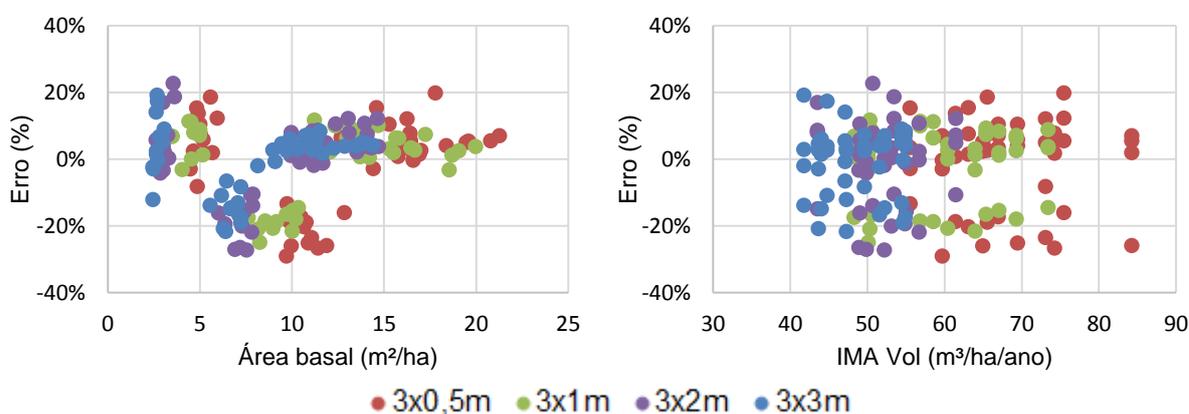


GRÁFICO 5.25 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DO VOLUME POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

continua

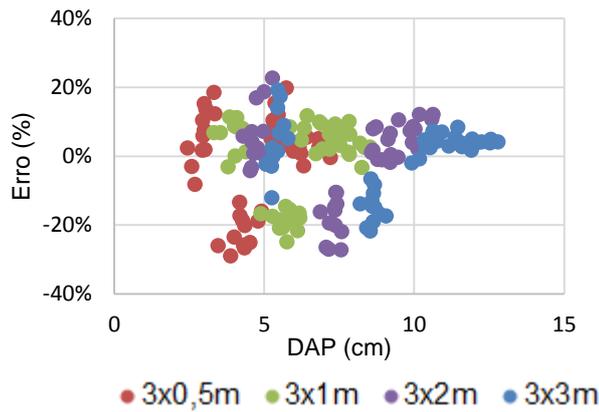


GRÁFICO 5.25 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DO VOLUME POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

FONTE: O autor (2014).

conclusão

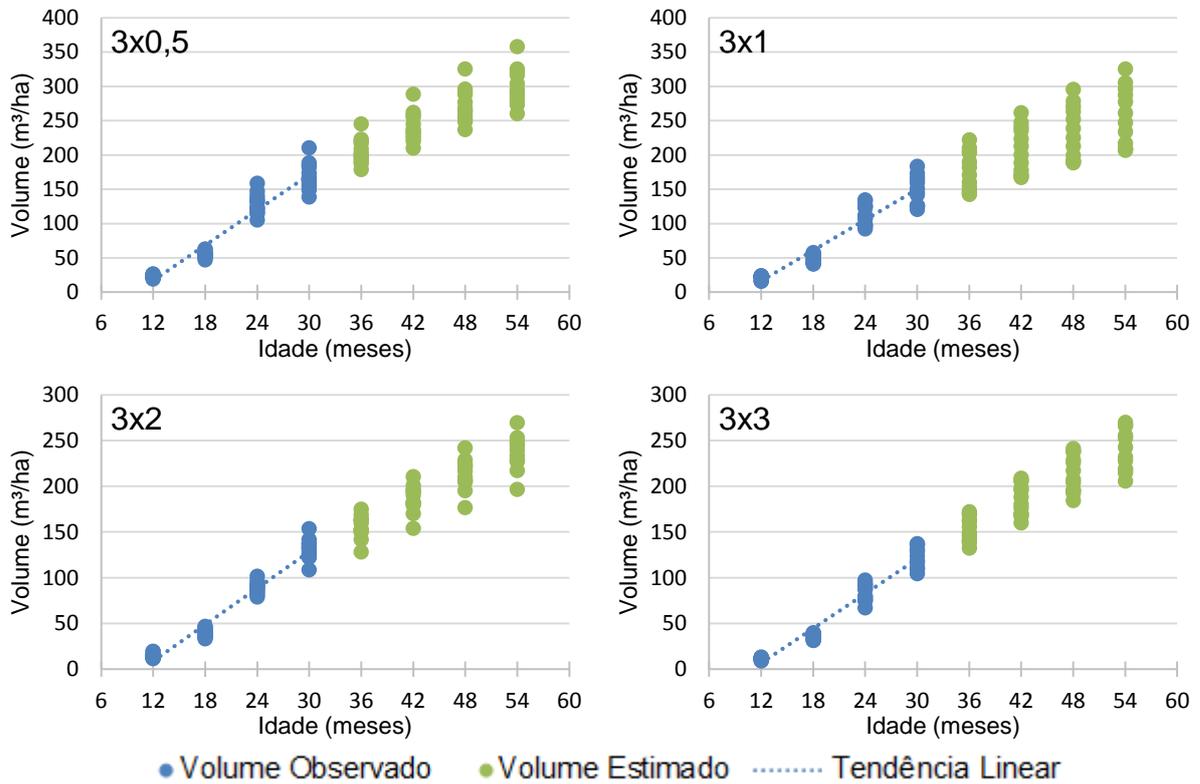


GRÁFICO 5.26 – VOLUME OBSERVADO E ESTIMADO PARA CADA IDADE E ESPAÇAMENTO.

FONTE: O autor (2014).

A TABELA 5.30 apresenta as estatísticas de precisão do ajuste do modelo de Clutter na estimativa da matéria seca total por hectare, para cada espaçamento. Assim como na estimativa do volume, quanto maior o espaçamento de plantio, melhores foram os ajustes.

TABELA 5.30 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE PARA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE.

Espaçamento	IA	Syx	Syx%	b0	b1	b2	b3
3x0,5	98,10%	9,573	10,17	4,604	-2,927	0,008	0,409
3x1	98,84%	6,701	4,51	3,406	-1,943	0,003	0,789
3x2	99,43%	4,595	3,51	4,294	-3,067	0,011	0,466
3x3	99,70%	3,425	2,81	4,145	-2,945	0,009	0,556

FONTE: O autor (2014).

O GRÁFICO 5.27 mostra a dispersão dos resíduos em função da área basal, do incremento médio anual aos 30 meses e do DAP. Observa-se que, para valores de área basal abaixo de 5 m<sup>2</sup>/ha, houve uma tendência de grande subestimativa da matéria seca total por hectare. Todo este grupo de resíduos, que também pode ser observado em função do IMA e do DAP, ocorreu nas estimativas aos 6 meses de idade, nos espaçamentos 3x1, 3x2 e 3x3m. Este resultado revela a dificuldade do modelo em estimar a matéria seca total nestes espaçamentos para povoamentos de idades mais jovens.

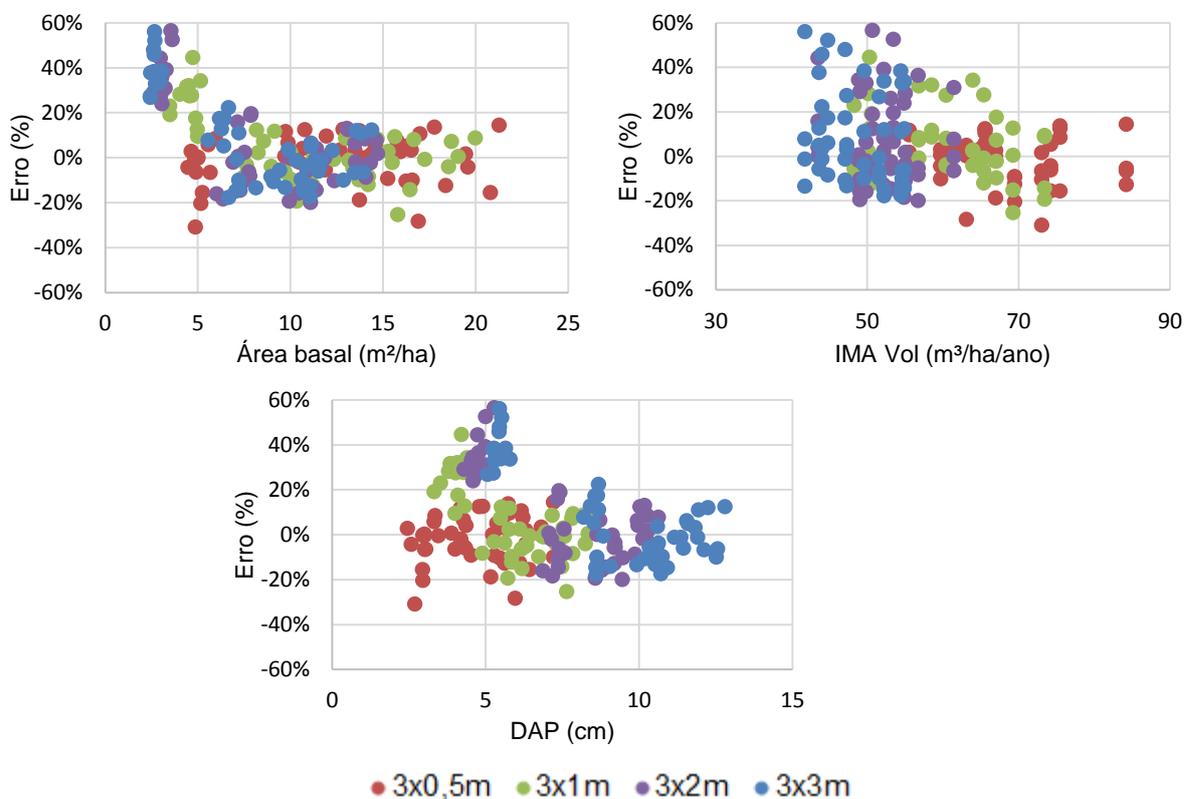


GRÁFICO 5.27 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DA MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

FONTE: O autor (2014).

A TABELA 5.31 revela os valores médios de volume e matéria seca total por hectare, estimados pelo modelo de Clutter, para cada espaçamento, clone e idade de projeção.

TABELA 5.31 – VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL MÉDIOS ESTIMADOS PELO MODELO DE CLUTTER.

Espaçamento	Clone	Volume (m³/ha)				Matéria Seca Total (t/ha)			
		36m	42m	48m	54m	36m	42m	48m	54m
3x0,5	1	189,9	223,1	251,8	276,6	61,5	69,6	76,3	82,0
3x1		157,9	185,3	208,9	229,4	68,8	80,2	90,0	98,4
3x2		143,4	172,0	197,2	219,3	73,9	89,4	103,1	115,2
3x3		139,4	168,7	194,6	217,5	74,0	89,2	102,7	114,6
3x0,5	2	215,5	253,3	285,9	314,1	69,0	77,8	85,2	91,4
3x1		160,9	188,2	211,8	232,2	68,6	79,9	89,7	98,1
3x2		156,0	186,9	214,2	238,0	78,6	95,0	109,6	122,4
3x3		162,5	196,8	227,2	254,1	79,2	95,3	109,5	122,0
3x0,5	3	201,9	237,1	267,6	293,9	63,7	72,2	79,3	85,2
3x1		179,7	208,9	233,9	255,4	71,8	83,8	94,1	102,9
3x2		154,9	184,3	209,9	232,2	76,6	92,4	106,3	118,5
3x3		142,6	172,2	198,4	221,5	71,2	86,4	99,8	111,8
3x0,5	4	215,4	253,1	285,6	313,8	67,8	76,6	84,1	90,3
3x1		213,0	249,8	281,6	309,0	86,8	101,1	113,4	124,0
3x2		169,0	201,9	230,6	255,8	82,7	99,9	115,1	128,5
3x3		168,4	204,1	235,8	263,8	81,7	98,1	112,4	125,1
3x0,5	Média	205,7	241,7	272,7	299,6	65,5	74,1	81,2	87,2
3x1		177,9	208,1	234,0	256,5	74,0	86,3	96,8	105,9
3x2		155,8	186,3	<b>213,0</b>	<b>236,3</b>	<b>78,0</b>	<b>94,2</b>	<b>108,5</b>	<b>121,1</b>
3x3		153,2	185,5	<b>214,0</b>	<b>239,2</b>	76,5	92,3	106,1	118,3

FONTE: O autor (2014).

Para a variável volume por hectare, observou-se a tendência de maior produção em maiores densidades de plantio. No entanto, a produção no espaçamento 3x2m foi inferior à do espaçamento 3x3m, na média, a partir dos 48 meses de idade.

Na produção de matéria seca por hectare, o resultado foi o contrário do observado na produção volumétrica. As maiores densidades de plantio acarretaram nas menores produções de biomassa para todo o período avaliado. O espaçamento 3x2m, de menor produção em volume, foi o que apresentou os maiores valores de matéria seca total em todas as idades, seguido pelos espaçamentos 3x3, 3x1 e, por último, o espaçamento 3x0,5m, com produção muito inferior aos demais.

Uma possível explicação para estes valores de produção de matéria seca por hectare podem ser os resultados apresentados no item 5.3 (biomassa da parte aérea), no qual se constatou uma tendência de redução da densidade básica da madeira com o adensamento do plantio.

Quanto aos clones, os resultados foram iguais para a produção volumétrica e em biomassa. Porém, estes variaram de acordo com o espaçamento utilizado. No espaçamento 3x0,5m, os clones 2 e 4 foram os que apresentaram a maior produção, com valores bem próximos em todas as idades. O clone 1 foi o que obteve a menor produção nesta densidade.

No espaçamento 3x1m, o clone 4 foi o de maior produção, seguido pelo clone 3. Os clones 1 e 2 apresentaram resultados bem próximos nesta densidade, sendo o primeiro o de menor produção. Nos espaçamentos 3x2 e 3x3m, a maior produção foi obtida pelo clone 4, seguido pelos clones 2, 3 e 1, nesta sequência.

## 5.6 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

O GRÁFICO 5.28 apresenta o crescimento acumulado das variáveis área basal, volume e matéria seca total por hectare, para cada espaçamento de plantio, e ilustra os resultados obtidos no item 5.5. Os valores se referem às médias dos quatro clones utilizados e são provenientes das estimativas realizadas anteriormente.

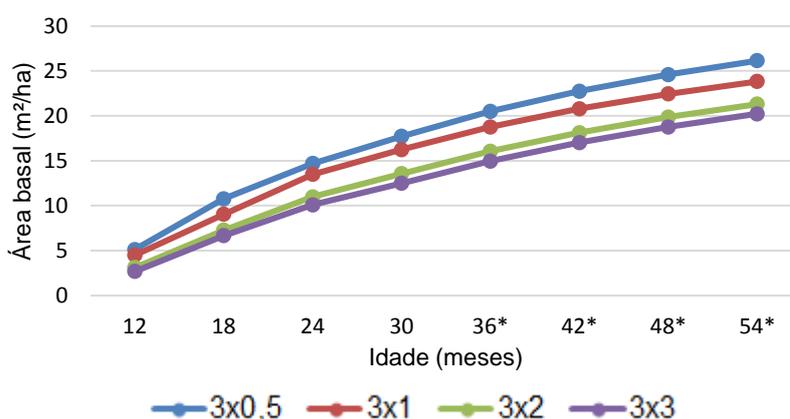


GRÁFICO 5.28 – CRESCIMENTO ACUMULADO DAS VARIÁVEIS ÁREA BASAL, VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

\*Projeções realizadas com auxílio do modelo de Clutter.

continua

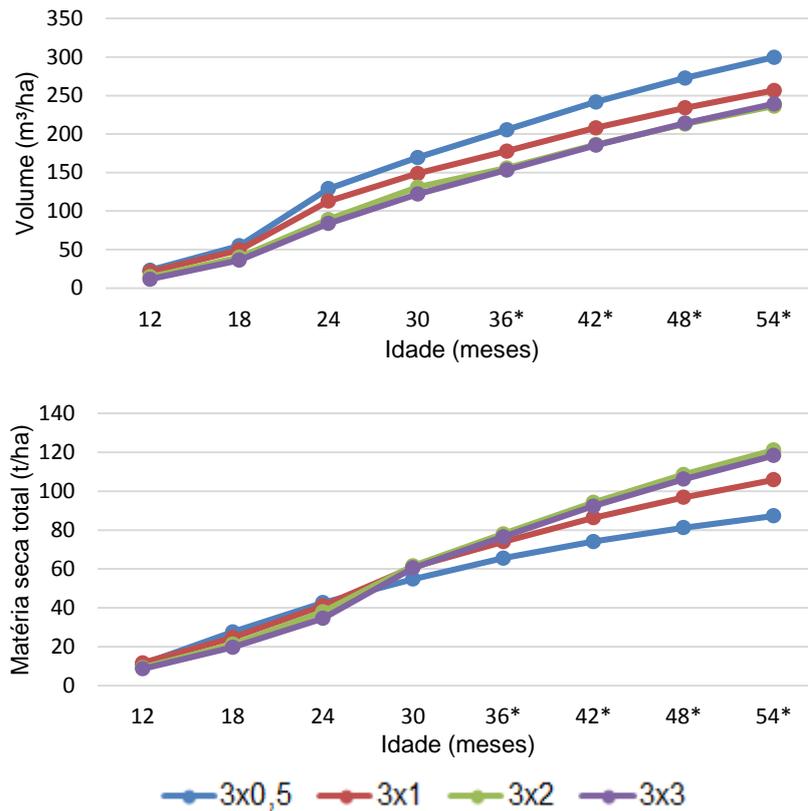


GRÁFICO 5.28 – CRESCIMENTO ACUMULADO DAS VARIÁVEIS ÁREA BASAL, VOLUME E MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

\*Projeções realizadas com auxílio do modelo de Clutter.

FONTE: O autor (2014).

conclusão

Os GRÁFICOS 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam o incremento médio anual (IMA) e o incremento corrente anual (ICA) das variáveis área basal, volume e matéria seca total por hectare, respectivamente, para cada espaçamento de plantio.

O ponto de máximo ICA, no qual a taxa de produção é máxima, corresponde ao ponto de inflexão da curva de produção. A partir dele, o crescimento da variável em análise passa a ser mais vagaroso, indicando que o indivíduo, ou o povoamento, passou da sua fase juvenil para a fase de maturidade.

O momento em que o ICA se iguala ao IMA coincide com o ponto de máxima tangência da curva de produção. Este ponto indica a idade de máxima produtividade biológica, a qual pode ser definida como a idade de rotação de uma floresta, em função da variável em análise.

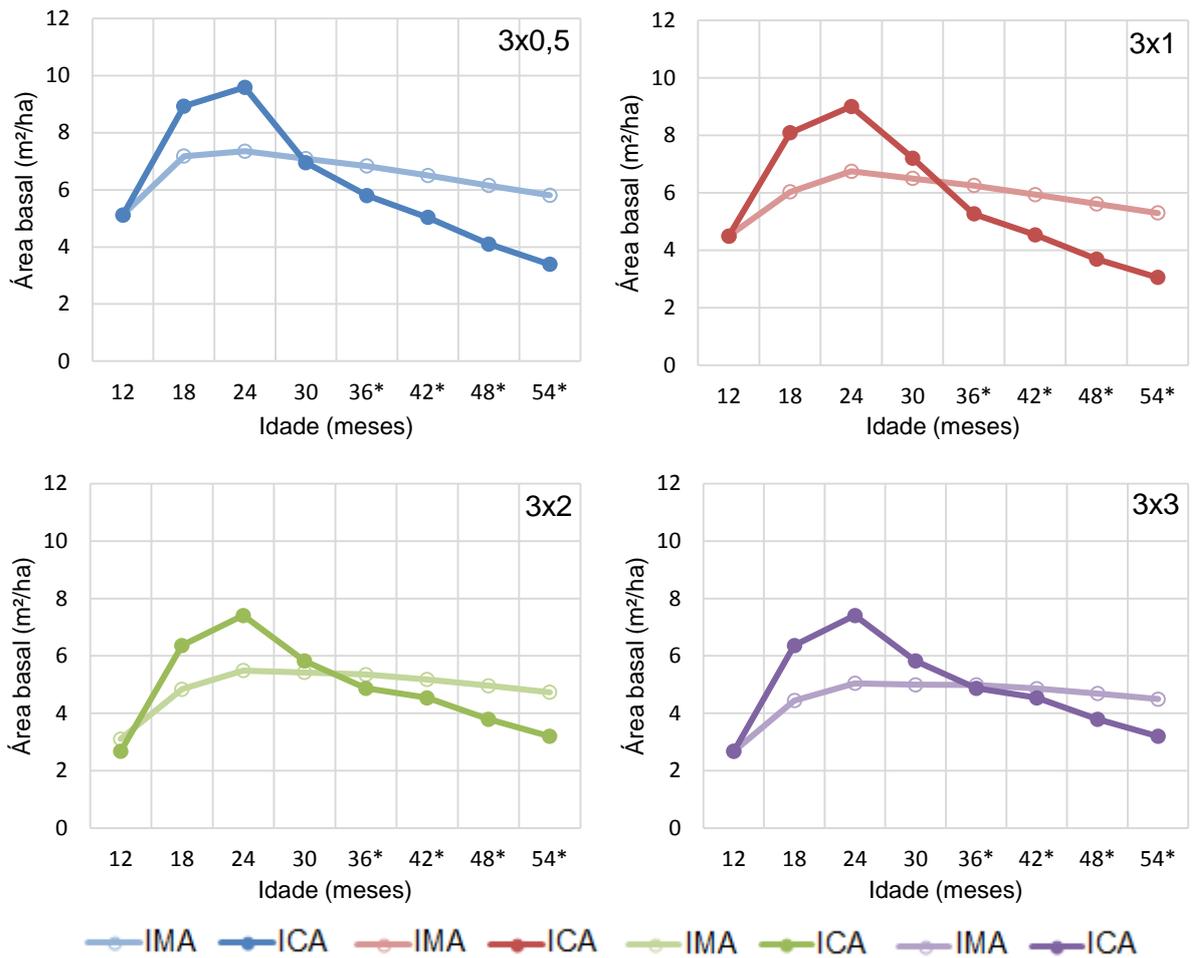


GRÁFICO 5.29 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) EM ÁREA BASAL PARA CADA ESPAÇAMENTO.

\*Projeções realizadas com auxílio do modelo de Clutter.

FONTE: O autor (2014).

Em todos os espaçamentos, a culminação do ICA da área basal ocorreu antes das demais variáveis, atingindo seu máximo aos 24 meses de idade. Para a área basal, o ICA se igualou ao IMA aos 30 meses no espaçamento 3x0,5m, aos 36 meses no espaçamento 3x3m e entre essas duas idades nos espaçamentos 3x1 e 3x2m.

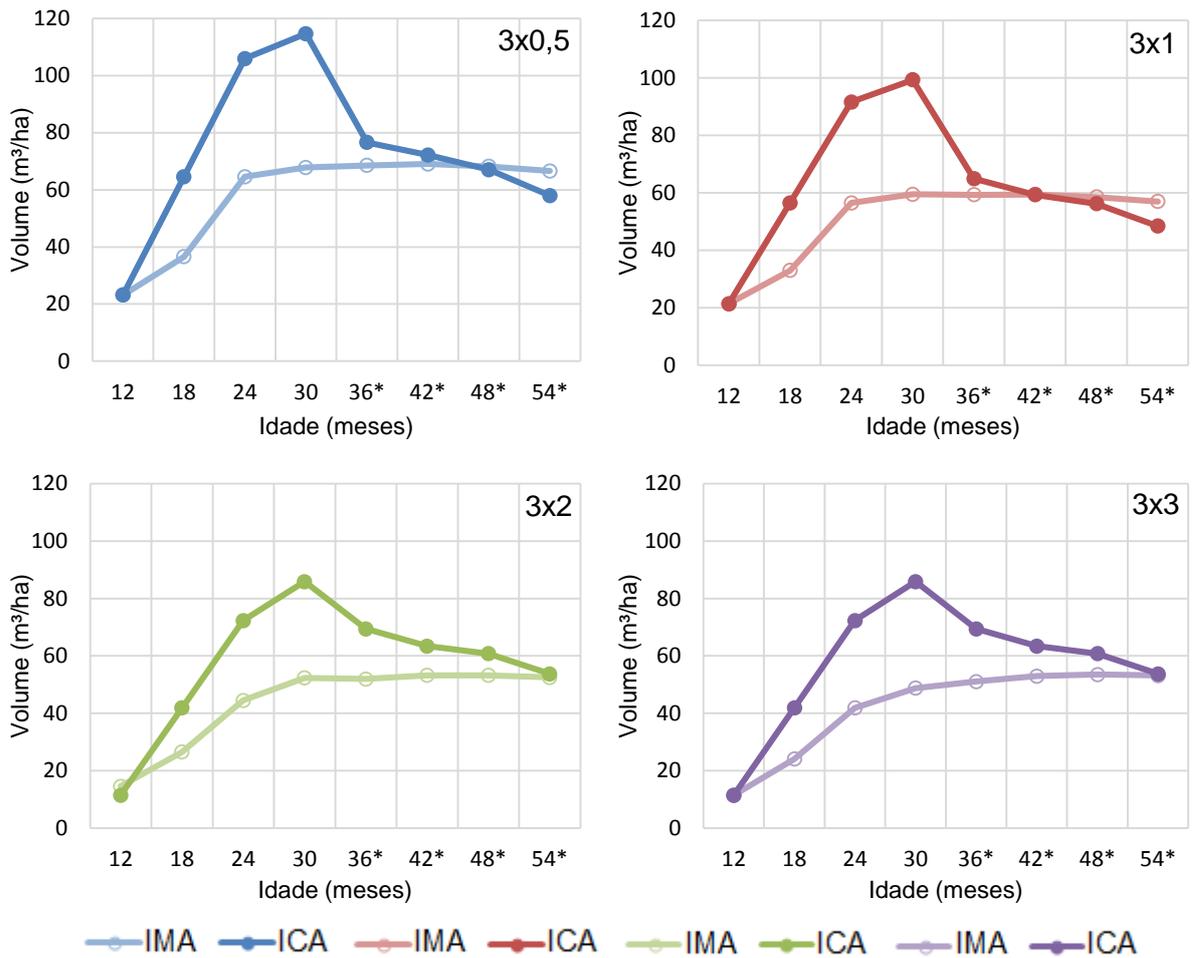


GRÁFICO 5.30 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) EM VOLUME POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

\*Projeções realizadas com auxílio do modelo de Clutter.

FONTE: O autor (2014).

Para a variável volume por hectare, o máximo ICA ocorreu aos 30 meses em todos os espaçamentos. O ICA em volume se igualou ao IMA entre as idades 42 e 48 meses nos espaçamentos 3x0,5 e 3x1m, enquanto nos espaçamentos 3x2 e 3x3m essa igualdade ocorre aos 54 meses de idade.

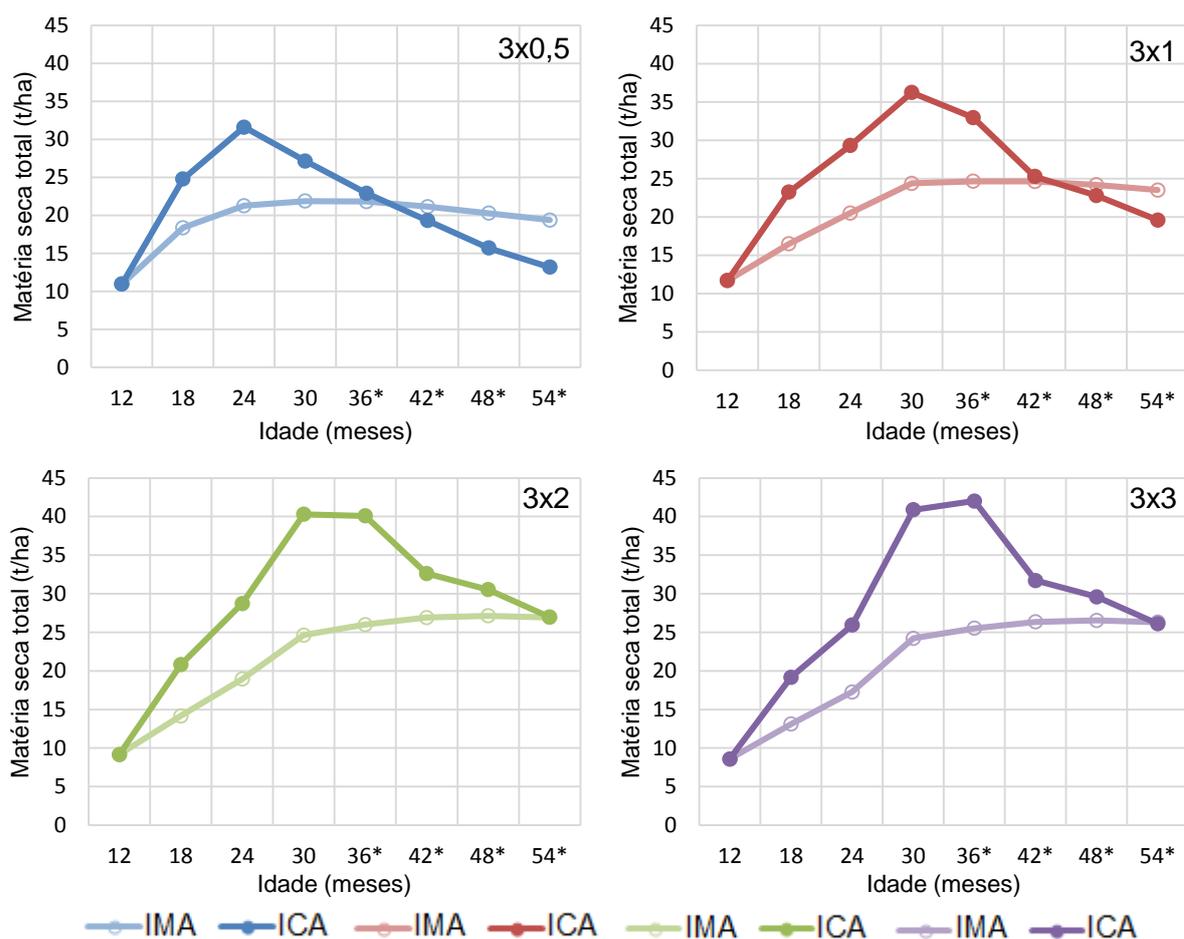


GRÁFICO 5.31 – INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO CORRENTE ANUAL (ICA) EM MATÉRIA SECA TOTAL POR HECTARE PARA CADA ESPAÇAMENTO.

\*Projeções realizadas com auxílio do modelo de Clutter.

FONTE: O autor (2014).

Na variável matéria seca total por hectare, nota-se um efeito mais marcante da densidade de plantio sobre o crescimento do povoamento. O máximo ICA ocorreu aos 24 meses no espaçamento 3x0,5m, aos 30 meses nos espaçamentos 3x1 e 3x2m, e aos 36 meses no espaçamento 3x3m.

O ICA em matéria seca total se igualou ao IMA entre as idades 36 e 42 meses no espaçamento 3x0,5, entre as idades 42 e 48 meses no espaçamento 3x1m, e aos 54 meses nos espaçamentos 3x2 e 3x3m.

Para validar esses resultados, avaliou-se a produção de matéria seca por hectare considerando sucessivas rotações. Comparou-se três idades próximas às apontadas como de máxima produtividade biológica para cada espaçamento, utilizando os valores de produção acumulada numa idade de corte comum a todas as rotações (TABELA 5.32).

TABELA 5.32 – PRODUÇÃO SOMADA DE MATÉRIA SECA TOTAL EM TONELADAS POR HECTARE PARA DIFERENTES IDADES DE ROTAÇÃO.

Espaçamento	Clone	Idade de rotação (meses)		
		30	36	42
3x0,5	1	2339	2153	2088
	2	2650	2415	2334
	3	1915	2230	2166
	4	2293	2373	2298
	Média	2297	2293	2223
Rotações*		42	35	30
Idade de corte comum**		1260 anos		

Espaçamento	Clone	Idade de rotação (meses)		
		36	42	48
3x1	1	1926	1925	1890
	2	1921	1918	1884
	3	2010	2011	1976
	4	2430	2426	2381
	Média	2072	2071	2033
Rotações*		28	24	21
Idade de corte comum**		1008 anos		

Espaçamento	Clone	Idade de rotação (meses)		
		42	48	54
3x2	1	6437	6495	6451
	2	6840	6905	6854
	3	6653	6697	6636
	4	7193	7251	7196
	Média	6782	6836	6782
Rotações*		72	63	56
Idade de corte comum**		3024 anos		

Espaçamento	Clone	Idade de rotação (meses)		
		42	48	54
3x3	1	6422	6470	6418
	2	6862	6899	6832
	3	6221	6287	6261
	4	7063	7081	7006
	Média	6646	6684	6625
Rotações*		72	63	56
Idade de corte comum**		3024 anos		

\* Número de rotações para atingir a idade de corte comum.

\*\* Mínimo Múltiplo Comum (MMC) das idades de rotação selecionadas.

FONTE: O autor (2014).

Presumindo a perpetuidade dos plantios com foco na produção de biomassa, observa-se que para o espaçamento 3x0,5m, a idade de rotação que maximiza produção acumulada de matéria seca total é de 30 meses para os clones 1 e 2, e de 36 meses para os clones 3 e 4.

Para o espaçamento 3x1m, as rotações aos 36 e 42 meses alcançaram produções praticamente iguais para todos os clones. Nos espaçamentos 3x2 e 3x3m, a rotação indicada foi de 48 meses, devido à maior produção acumulada para todos os clones.

Utilizando as rotações de 36 meses para o espaçamento 3x0,5m, 42 para o espaçamento 3x1m e 48 meses para os demais, avaliou-se novamente a produção acumulada em uma idade de corte comum às rotações, com o objetivo de comparar os clones utilizados e os diferentes espaçamentos de plantio (TABELA 5.33).

TABELA 5.33 – PRODUÇÃO SOMADA DE MATÉRIA SECA TOTAL EM TONELADAS POR HECTARE PARA CADA CLONE E ESPAÇAMENTO.

Clone	Espaçamento			
	3x0,5	3x1	3x2	3x3
1	1722	1925	2165	2157
2	1932	1918	2302	2300
3	1784	2011	2232	2096
4	1898	2426	2417	2360
Média	1834	2071	2279	2228
Rotações*	28	24	21	21

\* Número de rotações para atingir a idade de corte comum.

FONTE: O autor (2014).

Para as idades de rotação escolhidas, a maior produção acumulada de matéria seca por hectare ocorreu no espaçamento 3x2m, seguido do espaçamento 3x3m. As menores produções foram observadas no espaçamento 3x0,5m, para quase todos os clones. O clone 4 foi que apresentou melhor desempenho, exceto no espaçamento 3x0,5m.

### 5.6.1 Discussão dos resultados

Os resultados sugerem uma rotação mais curta para plantios de maiores densidades e rotação mais longa para plantios com maior área disponível por planta, conforme o esperado.

Para uma floresta com finalidade energética, quanto maior a quantidade de biomassa por unidade de área, maior será a produção de energia. Desta forma, a idade de rotação ótima dos plantios avaliados, com base na produtividade biológica, deve estar compreendida entre os 30 e 42 meses para o espaçamento 3x0,5m ( $1,5 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$ ), entre os 36 e 48 meses para o espaçamento 3x1m ( $3\text{m}^2.\text{planta}^{-1}$ ) e entre os 42 e 54 meses para os espaçamentos 3x2 e 3x3m ( $6$  e  $9\text{m}^2.\text{planta}^{-1}$ ).

No entanto, ainda deve ser definida a viabilidade econômica de cada regime, a partir da análise dos custos de implantação, manutenção, colheita e transporte, visto que o número de árvores por hectare e suas dimensões influenciam diretamente o custo de toda a cadeia de processos. Quanto maior o número de rotações para atingir uma determinada produção, maior também será o custo por unidade do produto desejado. Compete ao manejador a definição da rotação econômica ótima.

**5.7 LIMITES DE ESTOQUE**

O GRÁFICO 5.32 apresenta o número de árvores por hectare em função do diâmetro médio quadrático (Dg), para todos os espaçamentos e idades avaliados.

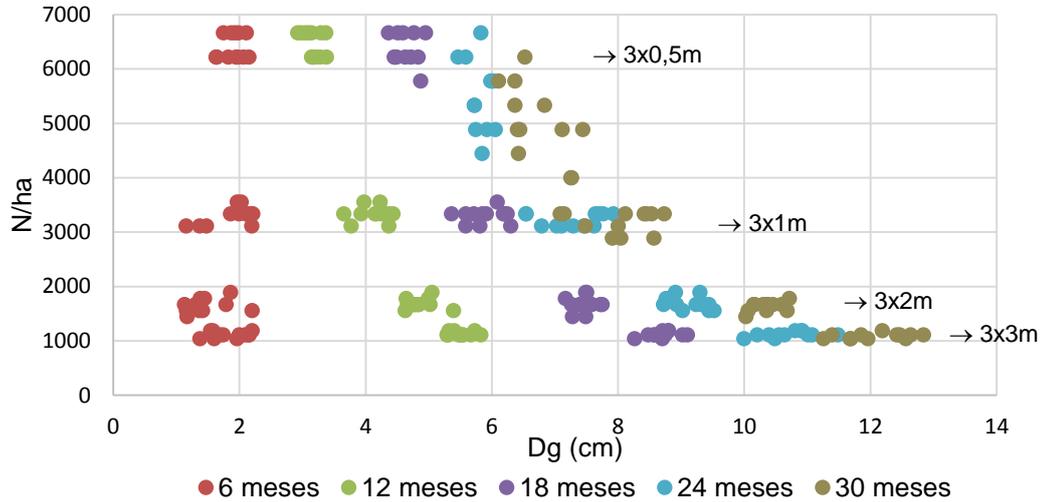


GRÁFICO 5.32 – RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE E O DIÂMETRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA CADA ESPAÇAMENTO E IDADE.

FONTE: O autor (2014).

Observa-se um declínio repentino da densidade de árvores por hectare no espaçamento 3x0,5m a partir da idade 24 meses, quando o povoamento atinge um Dg em torno de 6 cm. Este resultado sugere que o processo de autodesbaste teve início, em função da elevada competição por recursos, tais como luz, água e nutrientes.

Com os dados de número de árvores por hectare e diâmetro médio quadrático do espaçamento 3x0,5m (1,5 m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>), ajustou-se o modelo de autodesbaste proposto por Tang *et al.* (1994) (Equação 15). A TABELA 5.34 revela as estatísticas de precisão do ajuste deste modelo e os coeficientes da equação.

$$Ln(N)_{(t)} = Ln(S_f) - \frac{1}{\gamma} Ln[(d_t/d_0)^{\beta\gamma} + (S_f/N_1)^\gamma - (d_1/d_0)^{\beta\gamma}] \tag{15}$$

TABELA 5.34 – ESTATÍSTICAS DO AJUSTE DO MODELO DE TANG.

IA	Syx	Syx%	S <sub>f</sub>	β	Y
58,86%	509,1	9,02	1334,98	1,00499	8,5338

FONTE: O autor (2014).

Apesar do baixo valor do índice de ajuste de Schlaegel (IA), o modelo ajustado apresentou um baixo erro padrão da estimativa (Syx%) e dispersão dos resíduos com boa distribuição e livre de tendenciosidades, conforme apresentado no GRÁFICO 5.33. No gráfico, nota-se que as melhores estimativas foram feitas para idades mais jovens, com menor dimensão do Dg e maior número de árvores por hectare.

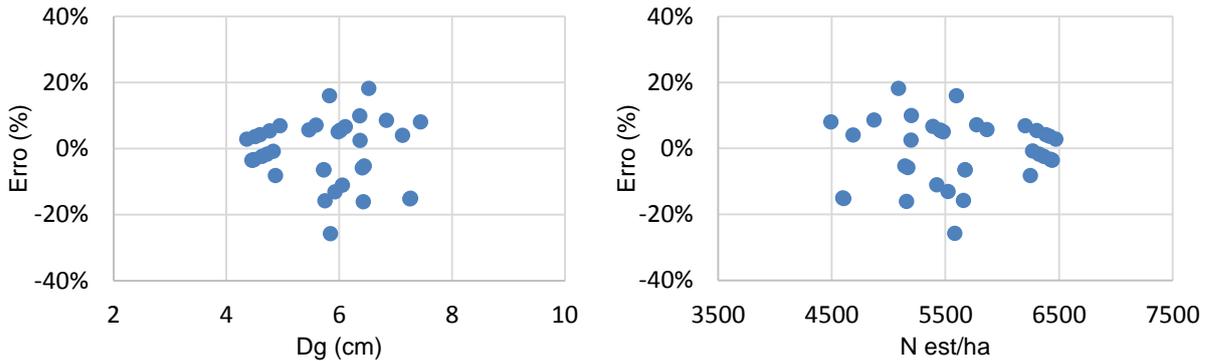


GRÁFICO 5.33 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS NA ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ÁRVORES POR HECTARE.

FONTE: O autor (2014).

O modelo ajustado permitiu obter a curva decrescente da máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio quadrático. Em seguida, utilizando os coeficientes do modelo, foram estimados os limites de densidade dos demais espaçamentos. O GRÁFICO 5.34 apresenta as curvas de máxima densidade em função do diâmetro para os quatro espaçamentos de plantio avaliados.

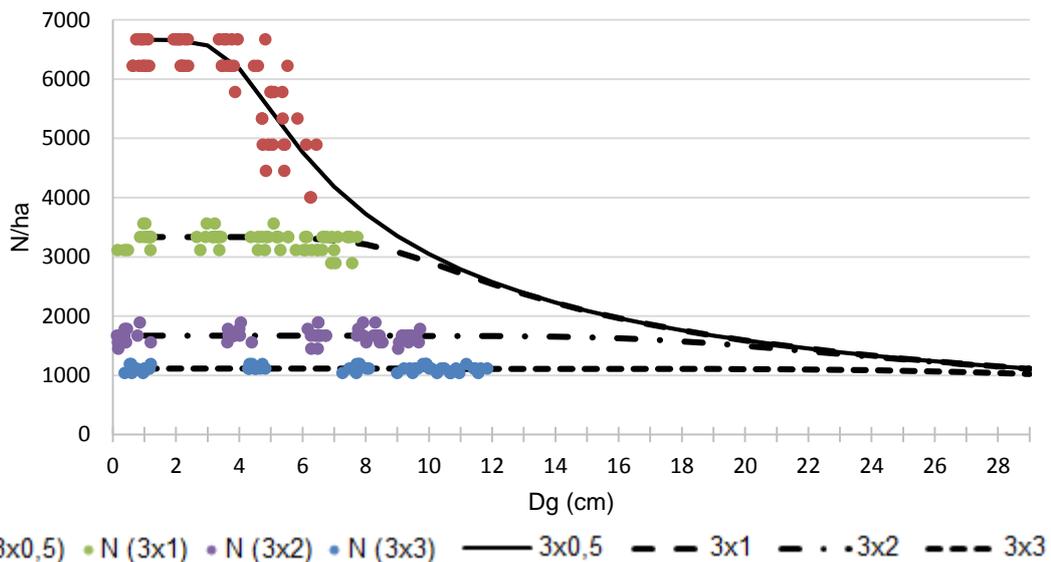


GRÁFICO 5.34 – CURVAS DE MÁXIMA DENSIDADE EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA CADA ESPAÇAMENTO.

FONTE: O autor (2014).

Percebe-se no gráfico que os valores observados do número de árvores por hectare no espaçamento 3x1m começaram a decrescer no momento em que o povoamento atingiu um Dg em torno de 8 cm. Neste momento, logo após os 30 meses de idade (final do período avaliado), a curva de máxima densidade calculada pelo modelo de Tang indica que o processo de autodesbaste deve começar a ocorrer.

Para os demais espaçamentos, este processo deverá ter início quando o Dg atingir valores em torno de 20 cm para o espaçamento 3x2m e acima de 28 cm para o espaçamento 3x3m.

### **5.7.1 Discussão dos resultados**

As análises apresentadas estão de acordo com o comentado por Schneider (2008). Segundo o autor, o autodesbaste ocorre numa dimensão de diâmetro médio diretamente proporcional à densidade de árvores de plantio, indicando que quanto maior o espaçamento inicial, maior será o diâmetro médio. Portanto, mais tarde ocorrerá o momento do início do autodesbaste na população.

Os resultados obtidos com o modelo de Tang *et al.* (1994) indicam que o processo de autodesbaste já teve início no espaçamento 3x0,5m e está prestes a começar no espaçamento 3x1m.

A ocorrência de uma maior taxa de mortalidade no espaçamento 3x1m pode ter grande influência sobre as estimativas de volume e biomassa por hectare do plantio com esta densidade. Sendo assim, as análises referentes aos incrementos médio e corrente poderão gerar resultados diferentes, com uma idade de rotação ótima menor do que a encontrada para este espaçamento.

De acordo com as taxas de crescimento observadas, os plantios com os espaçamentos 3x2 e 3x3m deverão atingir as dimensões necessárias para o início do processo de autodesbaste apenas em idades superiores à idade de rotação ótima, o que é extremamente desejável do ponto de vista do manejo florestal.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados das análises efetuadas, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Espaçamentos mais amplos promoveram um maior desenvolvimento individual, resultando em árvores com maiores valores de DAP, altura, volume e matéria seca total;

- O adensamento do plantio resultou em povoamentos com grande número de árvores de pequenas dimensões, com grande variação entre indivíduos, maior número de árvores dominadas, elevada taxa de mortalidade e estagnação do crescimento em idades mais jovens;

- O desempenho dos modelos para estimativa do volume e biomassa foi satisfatório para todas as densidades de plantio, independentemente das dimensões de seus indivíduos e da estrutura do povoamento;

- O uso do incremento médio anual (IMA) em volume como substituto ao índice de sítio no ajuste do modelo de Clutter se mostrou uma boa alternativa na estimativa do volume e da biomassa para parcelas de pequenas dimensões, classificadas como de mesma capacidade produtiva;

- A produção em volume por hectare foi diretamente proporcional à densidade do povoamento, com maiores valores ao final do período avaliado (30 meses) no espaçamento 3x0,5m ( $1,5 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$ ) e menores valores no espaçamento 3x3m ( $9\text{m}^2.\text{planta}^{-1}$ );

- Para os materiais genéticos avaliados, o espaçamento de plantio não teve influência sobre o poder calorífico e o teor de cinzas da madeira e galhos, não existindo diferença significativa entre os valores encontrados para estas propriedades em cada espaçamento;

- A produção em matéria seca total por hectare aos 30 meses de idade foi menor no espaçamento mais denso ( $1,5 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$ ) e praticamente igual nos demais espaçamentos (3, 6 e  $9 \text{ m}^2.\text{planta}^{-1}$ );

- A energia potencial por hectare está intimamente relacionada com a produção de biomassa e será tão grande quanto for a produção de matéria seca nesta mesma área, independentemente das propriedades físicas e energéticas das árvores;

- O clone 4 obteve uma maior produção por hectare aos 30 meses de idade, para todos os espaçamentos na produção em volume e com exceção do espaçamento 3x0,5m na produção de biomassa;

- Com base na máxima produtividade biológica e presumindo a perpetuidade dos plantios, a idade de rotação ótima dos povoamentos avaliados deve estar compreendida entre os 30 e 42 meses para o espaçamento 3x0,5m, entre os 36 e 48 meses para o espaçamento 3x1m e entre os 42 e 54 meses para os espaçamentos 3x2 e 3x3m;

- Nestas condições, o espaçamento 3x2m gerou a maior produção de matéria seca total por hectare para todos os clones, seguido do espaçamento 3x3m, com produções bem próximas. O clone 4 foi o de melhor desempenho, exceto no espaçamento 3x0,5m, no qual sua produção foi inferior à do clone 2;

- As idades de rotação identificadas para os espaçamentos 3x0,5 e 3x1m coincidiram com o limite máximo de densidade suportados por estes plantios. Rotações superiores à essas estarão sujeitas à elevadas taxas de mortalidade, acarretando na perda de capital, caso não seja realizada alguma intervenção;

- A competição por recursos entre indivíduos do mesmo povoamento nos espaçamentos 3x2 e 3x3m deverá ocorrer em idades mais avançadas, superiores à idade de rotação de máxima produtividade biológica.

Para que as análises a respeito do efeito do espaçamento sobre a densidade básica da madeira possam ser conclusivas, recomenda-se que sejam utilizadas amostras ponderadas das diferentes posições no tronco da árvore e que estas sejam feitas por indivíduo. A análise química da madeira também pode auxiliar a interpretação dos resultados obtidos para a densidade básica.

A continuidade nas medições do experimento é de grande valia para a confirmação dos resultados obtidos, com a qual será possível verificar se o crescimento dos plantios nas diferentes densidades mantém a mesma tendência. O estudo sobre o efeito de diferentes arranjos de plantio também é de grande importância, no sentido de evitar conclusões generalizadas à respeito da influência de determinada área disponível por planta sobre o seu crescimento.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, E. C. R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 70 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.
- AGUIAR, R. A necessidade de políticas de curto prazo em eficiência energética. **Biomassa e Energia**, 16 de Janeiro de 2014. <Disponível em: <[http://www.biomassabioenergia.com.br/noticia/a-necessidade-de-politicas-de-curto-prazo-em-eficiencia-energetica/20140116121154\\_Y\\_394](http://www.biomassabioenergia.com.br/noticia/a-necessidade-de-politicas-de-curto-prazo-em-eficiencia-energetica/20140116121154_Y_394)>. Acesso em: 18/01/2014.
- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. Viçosa: Editora UFV, 2004. 422 p.
- ALZATE, S. B. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 68, p. 87-95, 2005.
- ASSIS, M. R. **Modelagem da biomassa seca e estoque de carbono total em *Eucalyptus* considerando diferentes estágios iniciais de crescimento**. 2012, 197 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). UFPA: Lavras-MG.
- ASSIS, R. L.; FERREIRA, M.M.; MORAIS, E.J.; FERNANDES, L.A. Produção de biomassa de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, sob diferentes espaçamentos na região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.23, n.2, 1999, p.151-156.
- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF). **Anuário Estatístico de 2013**. Brasília, 2013.
- BALLONI, E. A.; SIMÕES, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. IPEF - **Série Técnica**. Piracicaba, v. 1, n. 3, p. 1 – 16. Set. 1980.
- BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MULLER, M. D.; COUTO, L. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 141-158, 2005.
- BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria - RS, 2002. v. 12, n. 2, p. 75-87.
- BERTOLA, A. **Eucalipto: verdades e mentiras**. Setor de Inventário Florestal – V&M Florestal Ltda. Curvelo, 2004.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BARNARD, H. R.; FOWNES, J. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**, New York, v. 5, p.58-67, 2002.

BIODIESEL. **Crédito de carbono – MDL**. 2013. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/credito-de-carbono/mdl/index.htm>>. Acesso em: 21/09/2013.

BOTELHO, S. A. Espaçamento. In: SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal**. Lavras: UFLA / FAEPE, 1998. 438 p. Cap. 9, p. 381-405.

BRASIL. Ministério Da Agricultura, Pecuária E Abastecimento. Instituto Nacional De Meteorologia. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. (Banco de Dados). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 27/11/2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)**. Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 10/09/2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/protocolo-de-quioto>>. Acesso em: 05/11/2013.

BRUZINGA, J. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; PEREIRA, I. M.; RABELO, L. D. O.; MURTA JÚNIOR, L. S.; DUARTE, A. L. A. Estoque de carbono em Floresta Estacional Semidecidual em regeneração. **Biomassa e Energia**, v. 5, n. 1, p. 77-83, 2012.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2002.

CALAIS, D. **Florestas Energéticas no Brasil: demanda e disponibilidade**. Associação Mineira de Silvicultura. 23 pp. 2009. Disponível em: <[http://silviminas.com.br/wp-content/uploads/2012/12/publicacao\\_585.pdf](http://silviminas.com.br/wp-content/uploads/2012/12/publicacao_585.pdf)>. Acesso em: 10/09/2013.

CAMPINHOS, E. J.; IKEMORI, Y. K. **Introdução de nova técnica na produção de mudas de essências florestais**. IPEF, n. 23, p. 47-52, 1983.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 470 p.

CAMPOS, J. C.; LEITE, H. G.; SOUZA, R. N.; VITAL, B. R. Relações entre espaçamento, volume e peso de madeira em plantações de eucalipto. **Revista Árvore**, v.14, n.2, 1990, p.119-133.

CANTO, J. L. do. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 127 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CARVALHO, S. P. C. **Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de *Eucalyptus sp* clonal para fins energéticos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). 103 p. Lavras: UFLA, 2010.

CASTRO, A. F. N. N. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus sp* na madeira e carvão vegetal**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). UFV, Viçosa-MG, 2011.

CDM WATCH. **Manual para Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): um recurso para cidadãos, ativistas e ONGs**. 2010. Disponível em: <[http://carbonmarketwatch.org/wpcontent/uploads/2012/03/CDM\\_Toolkit\\_PG.pdf](http://carbonmarketwatch.org/wpcontent/uploads/2012/03/CDM_Toolkit_PG.pdf)>. Acesso em: 27/09/2013.

COMISSÃO EUROPEIA. **Compreender as políticas na União Europeia: Energia**. Bruxelas, Bélgica, 2013. Disponível em: <[http://europa.eu/pol/ener/flipbook/pt/files/energy\\_pt.pdf](http://europa.eu/pol/ener/flipbook/pt/files/energy_pt.pdf)>. Acesso em 03/12/2013.

COMISSÃO EUROPEIA. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comitê Econômico Social Europeu e ao Comitê das Regiões: **Roteiro para a Energia 2050**. 15 de dezembro de 2011. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0885:FIN:PL:PDF>>. Acesso em: 04/12/2013.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p.

COUTO, H. T. Z.; BATISTA, J. L. F.; RODRIGUES, L. C. E. Mensuração e gerenciamento de pequenas florestas **Documentos Florestais** – ESALQ - USP. Piracicaba (5): 1-37, nov.1989.

COUTO, L.; MULLER, M. D.; TSUKAMOTO, A. A.; BARCELLOS, D. C.; FONSECA, E. M. B.; CORRÊA, M. R. Programa de pesquisa para avaliação de densidades de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para produção de biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p.107-112, 2004.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. São Paulo: UNICAMP, 2008. 736 p. Cap. 4, p. 93-111.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; DIAS, A. N.; TSUKAMOTO, A. A.; FONSECA, E. M. B.; CORRÊA, M. R. **Espaçamentos de plantio de espécies de rápido crescimento para dendroenergia**. Belo Horizonte: CEMIG, 2002.

COUTO, L.; MULLER, M. D.; TSUKAMOTO, A. A. **Florestas plantadas para energia: aspectos técnicos, sócio-econômicos e ambientais**. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

EIA. U.S. Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2013**. Washington, DC. 2013. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/ieo/more\\_highlights.cfm](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/more_highlights.cfm)>. Acesso em: 03/12/2013.

ELOY, E.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SOUZA, V. Q.; SCHMIDT, D. Variação axial e efeito do espaçamento na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mearnsii*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 04, n. 02, p. 215-227, Novembro de 2013.

FREDERICO, P. G. U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.** 66f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, MG, 2009.

FUJIHARA, M. A.; CAVALCANTI, R.; GUIMARÃES, A.; GARLIPP, R. **O valor das florestas.** São Paulo: Terra das Artes Editora, 2009.

GARCIA, C.H.; CORRADINE, L.; ALVARENGA, S.F. Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos. **IPEF**, p. 1-8, 1991. (Circular Técnica, 179).

GARCIA, E.A; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S.; OGURI, G. Biomassa de clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para produção de briquetes. In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2011, Cuiabá – MT. **Anais.** 2011.

GARLET, V.N. **Influência do espaçamento das árvores de *Eucalyptus grandis* na qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica Kraft.** 1995. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na Região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.4, p.895-905, 2011.

GEVORKIANTZ, S. R. & OLSEN, L. P. **Composite volume table for timber and their application in the Lake State.** Washington, D.C., U.S.D.A., 1965.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; GARCIA, E. A.; SPINELLI, R. Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas. In: LEMOS, E. G. M.; STRADIOTTO, N. R. **Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação.** São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. 1069 p. Cap. 6, p. 125-161.

HASELEIN, C. R.; BERGER, R.; GOULART, M.; STHAL, J.; TREVISAN, R.; SANTINI, E. J.; LOPES, M. C. Propriedades de flexão estática da madeira e umidade e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 147-152, 2002.

HIGASHI, E. N.; SILVEIRA, R. L. V. A.; GONÇALVES, A. N. **Propagação vegetativa de *Eucalyptus***: princípios básicos e a sua evolução no Brasil. Circular Técnica, IPEF. n. 192. 2000. Disponível em:

<<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3637/ipef-circular-tecnica-2000-outubro-n-192.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 11/09/2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 27/11/2013.

JOHNSON, P. S.; SHIFLEY, S. R.; ROGERS, R. **The ecology and silviculture of oaks**. 2 ed. [1 ed 1941], CABI Publishing, Wallingford and New York, 503 p. 2002.

LACERDA, J. S., COUTO, H. T. Z. **O uso da lei do autodesbaste na definição do espaçamento para plantios de *Eucalyptus***. Piracicaba: IPEF, 1993. 7p. (Circular Técnica, 182)

LEÃO, R. M. **A floresta e o homem**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000. 434 p.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**. Viçosa – MG, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n. 59, p. 77-87, 2001.

LIMA, W. P. **Impacto Ambiental do Eucalipto**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.

LONSDALE, W. M. The self-thinning rule: dead or alive? **Ecology**, vol. 71, n. 4, p. 1373-1388, 1990.

LOPES, I. V. **O mecanismo de desenvolvimento limpo**: guia de orientação. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 2002.

LOUREIRO, G. H. **Diagrama de manejo de densidade para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2013.

MACEDO, J. H. P.; MACHADO, S. A. **A Engenharia Florestal da UFPR**: história e evolução da primeira do Brasil. 513 p. Curitiba, 2003.

MACHADO, F. C.; GUERRA, S. P. S.; CERAGIOLI, N.; OGURI, G.; DENADAI, M. S. Influência do espaçamento na produtividade e alocação de biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis*. In: 7º Congresso Internacional de Bioenergia, 2012, São Paulo-SP. **Anais...**São Paulo – SP. 2012.

MACHADO, S. A. Mensuração florestal. UFPR, Curitiba, mai. 2012. Anotações de caderno.

MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO, D. J. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Vol. 4, no. 2, 2002.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

MAGALHÃES, J. L. Futuro do carvão vegetal no contexto nacional e internacional. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Florestal**. *Anais. Society for Forest Research*, 1993.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria Do Estado De Meio Ambiente, Do Planejamento, Da Ciência E Tecnologia (SEMACE). **Caderno Geoambiental das Regiões de Planejamento do MS**. Campo Grande, MS, 2011.

MEAD, D. J. Forests for energy and the role of planted trees. **Critical Reviews in Plant Sciences**, 2005.

MELLO, H. A.; SIMÕES, J. W.; MASCARENHAS SOBRINHO, J.; COUTO, H. T. Z. Influência do espaçamento na produção de madeira de eucalipto em solo de cerrado. IPEF n.2/3, p.3-30, 1971.

MENDONÇA, A. R. de. **Modelagem não linear do crescimento e da produção de plantações florestais**. 84 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução de: CALADO, Verônica. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo, 2000.

MORAIS, V. M. **Dinâmica de crescimento de eucalipto clonal sob diferentes espaçamentos na região noroeste do Estado de Minas Gerais**. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. O Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto Internacional**, Rio de Janeiro, vol. 30, no 1, janeiro/abril, 2008.

MULLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MÜLLER, M. D.; COUTO, L. LEITE, H. G.; BRITO, J. O. Avaliação de um clone de eucalipto estabelecido em diferentes densidades de plantio para produção de biomassa e energia. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 3, p. 177-186, 2005.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. M. Qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**. \_\_. v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S.; TROSSERO, M. A.; FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.

OLIVEIRA NETO, S. N.; GONÇALVES REIS, G.; FERREIRA REIS, M. G.; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.1, p.15-23, 2003.

OLIVEIRA, J. C. **Modelagem de crescimento e produção de povoamentos de eucalipto empregando mínimos quadrados generalizados**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 429p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 1998.

OLIVEIRA, M. L. R. **Mensuração e modelagem do crescimento e da produção de povoamentos não-desbastados de clones de eucalipto**. 103f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

OLIVEIRA, M. L. R., LEITE, H. G., NOGUEIRA, G. S., CAMPOS, J. C. C. Modelagem e prognose em povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Revista Árvore**: Viçosa - MG, v. 33, n. 5, p. 841-852, 2009.

PINKARD, E. A.; NEILSEN, W. A. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 172, n. 2/3, p. 215-227, Jan. 2003.

PNUD; IPEA; FJP. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013**: Perfil Municipal - Três Lagoas, MS. 2013. Disponível em: <[http://atlasbrasil.org.br/2013/perfil/tres-lagoas\\_ms](http://atlasbrasil.org.br/2013/perfil/tres-lagoas_ms)>. Acesso em: 05/12/2013.

POGGIANI, F. Ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos. **IPEF** (Série Técnica), n. 27, p. 17-30, 1984.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z.; CORRADINI, L. FAZZIO, E. C. M. Exportação de biomassa e nutrientes através da exploração dos troncos e das copas de um povoamento de *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, n. 25: p. 37-39, 1983.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z.; SIMÕES, J. W. Aspectos ecológicos das mini-rotações e do aproveitamento dos resíduos florestais. **IPEF** (Circular Técnica), Piracicaba, n. 74, p. 1-7, 1979.

QUÉNO, L. R. M. **Viabilidade econômica da produção de biomassa de eucalipto e de capim elefante para energia**. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2009.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

REINEKE, L. H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. **Journal of Agricultural Research**, v.46, p.627-638, 1933.

REIS, M. G. F. et al. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, v.9, n.2, p.149-162, 1985.

RESENDE, R. R.; DO VALE, A. B.; SOARES, T. S.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; DO VALE, R. S. Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore: Viçosa - MG**, v. 28, n. 2, p. 219-225, 2004.

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

ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. **Energia da madeira**. 86 p. Curitiba: FUPEF, 1998.

RODRIGUES, L. C. E. Gerenciamento da produção florestal. **Documentos Florestais** – ESALQ - USP. Piracicaba (13): 1-41, Mai.1991.

SANTANA, W. M. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Revista Cerne**, Lavras – MG, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore** (Impresso), Viçosa - MG, v. 36, p. 971-980, 2012.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n.90, p.221-230, 2011.

SCHEEREN, L. W.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Crescimento e Produção de povoamentos monoclonais de *Eucalyptus saligna* Smith manejados com desbaste, na Região Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 111-122, 2004.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. 348 p. Santa Maria: UFSM/CEPEF-FATEC, 1993.

SCHNEIDER, P. R. **Manejo florestal: planejamento da produção florestal**. 493 p. Santa Maria: UFSM, 2004.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. S. P.; FLEIG, F. D.; THOMAS, C.; FARIAS, J. A. Quociente do diâmetro pelo área basal e zonas de competição em povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.21, n.4, p 757-766, out-dez, 2011.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2 ed. 556 p. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008.

SCHNEIDER, P. S. P. **Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade em Povoamentos de *Pinus taeda* L.** 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008 b.

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

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.

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

SCOLFORO, J. R. S.; MAESTRI, R. O manejo de florestas plantadas. In: SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal**. Lavras: UFLA / FAEPE, 438 p. Cap. 8, p. 315-379, 1998.

SILVA, A. L. C. **Introdução à análise de dados**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2011. Disponível em:  
<<http://books.google.com.br/books?id=ixaS4rPFWH4C&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em 29/07/2013.

SILVA, C. R. **Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região nordeste do Estado de São Paulo**. 2005. 51p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2005.

SILVA, J. F. **Variabilidade genética em progênies de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh e sua interação com espaçamentos**. 126p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

SILVA, J. M. S. **Estudo silvicultural e econômico do consórcio de *Eucalyptus grandis* com gramíneas sob diferentes espaçamentos em áreas acidentadas.** 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

SOARES, C. P. B. S.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; CARVALHO, A. Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal. **Revista Árvore: Viçosa – MG.** v.28. n. 6. p. 831-837, 2004.

SORESINI, L. Benefícios Sociais e Econômicos da Pesquisa Florestal. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Florestal**, 1, Belo Horizonte, 1993. *Anais.* Belo Horizonte, Sociedade de Investigações Florestais, 1993, p. 300-305.

TANG, S.; MENG, C. H.; MENG, F. R., A growth and self-thinning model for pure even-aged stands: theory and applications. **Forest Ecology and Management**, St. Louis, v. 70, n. 1, p. 67-73, 1994.

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

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.** Novos Estudos, CEBRAP, 79, Novembro 2007, p. 47-69. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/nec/n79/03.pdf>. Acesso em: 14/10/2013.

TREVISAN, R.; ELOY, E.; DENARDI, L.; HASELEIN, C. R.; CARON, B. O. Variação axial e efeito do desbaste na massa específica das árvores centrais de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 312-318, 2012.

TRUGILHO, P.F.; TARCÍSIO, J. L.; AKIRA, F. M.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 2001.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Bioeletricidade atinge o equivalente a uma Belo Monte em potência instalada.** São Paulo, 21 de Novembro de 2013. Disponível em: <http://www.unica.com.br/noticia/25007302920341358852/bioeletricidade-atinge-o-equivalente-a-uma-belo-monte-em-potencia-instalada/>. Acesso em: 09/12/2013.

UNIÃO EUROPEIA. **Política Europeia de Energia.** In: Sínteses da Legislação da UE. 2013. Disponível em: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/european\\_energy\\_policy/index\\_pt.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/index_pt.htm). Acesso em: 03/12/2013. .

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. **Revista Cerne**, Lavras - MG, v. 6, n. 1, p, 83-88, 2000.

VALOR ECONÔMICO. **O Brasil terá seguro para créditos de carbono.** In: Notícias MDL Sustentável. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/financas/1022298/seguro-de-credito-de-carbono-chega-ao-brasil>>. Acesso em: 10/11/2013.

VANCLAY, J. K. **Modeling forest growth and yield:** applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, U.K., 1994.

VIEIRA, S. **Introdução à bioestatística.** 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1980.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito do espaçamento na produção em peso e na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 52 meses de idade. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 11, n. 2, p. 132-145, 1987.

VITAL, B.R. Métodos de determinação da densidade da madeira. SIF/UFV - **Boletim Técnico**, n. 1, p. 1-21, 1984.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

YODA, K.; KIRA, T.; OGAWA, H.; HOZUMI, K., Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. **Journal of Biology**, Osaka City, v.14, p.107- 129, 1963.

ZEIDE, B. Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. **Forest Science**, n. 33, p. 517–537, (1987).

ZEIDE, B. Thinning and growth: a full turnaround. **Journal of Forestry**, n. 99(1), p. 20–24, (2001).

## ANEXO I

TABELA A.1 – RESULTADOS DO DIAGRAMA DE CAIXA (BOXPLOT) PARA DADOS DE DAP.

Espaçamento	Idade (meses)	Outliers	Árvores total	Árvores úteis	Mín NO (cm)	Máx NO (cm)	Mediana (cm)	Amplitude (cm)
3x0,5 m	6	19	189	170	0,57	3,21	2,01	2,64
	12	26	188	162	1,27	4,93	3,39	3,66
	18	7	187	180	0,64	7,70	4,90	7,07
	24	10	165	155	1,37	9,39	5,76	8,02
	30	-	138	138	1,27	10,92	6,59	9,64
3x1 m	6	-	181	181	0,32	2,83	2,01	2,51
	12	13	181	168	1,97	5,57	4,27	3,60
	18	12	181	169	2,45	8,28	6,14	5,83
	24	6	178	172	2,23	10,98	7,45	8,75
	30	5	174	169	2,07	12,73	8,10	10,66
3x2 m	6	-	198	198	0,16	3,25	1,48	3,09
	12	6	194	188	2,39	6,62	5,00	4,23
	18	10	196	186	4,27	10,28	7,80	6,02
	24	15	195	180	5,73	12,45	9,29	6,72
	30	14	177	163	6,37	14,13	10,50	7,77
3x3 m	6	16	195	179	0,64	3,21	1,88	2,58
	12	14	195	181	3,98	6,97	5,63	2,99
	18	10	194	184	6,37	10,60	8,91	4,23
	24	9	193	184	7,80	12,86	10,82	5,06
	30	6	176	170	8,40	14,96	12,27	6,56

Árvores úteis: árvores com DAP dentro do limite calculado; Mín NO e Máx NO: mínimo e máximo valor não-outlier, respectivamente.

FONTE: O autor (2014).