



**MODELAGEM DE AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS
PARA CURTA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO EM DIFERENTES
ESPAÇAMENTOS**

KÁLITA LUIS SOARES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**MODELAGEM DE AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE
MULTIPRODUTOS PARA CURTA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO EM
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

KÁLITA LUIS SOARES

ORIENTADOR: PROF. DR. MAURO ELOI NAPPO

COORIENTADOR: PROF. DR. RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA CASTRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM-304/2018

BRASÍLIA/ DF: JANEIRO - 2018

Brasília, 23 de janeiro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“MODELAGEM DE AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS
PARA CURTA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO EM DIFERENTES
ESPAÇAMENTOS”

KÁLITA LUIS SOARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

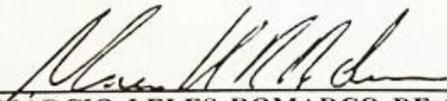
APROVADA POR:



Prof. Dr. MAURO ELOI NAPPO (Departamento de Engenharia Florestal –
EFL/UnB);
(Orientador)



Prof. Dr. RICARDO DE OLIVEIRA GASPAR (Departamento de Engenharia
Florestal – EFL/UnB);
(Examinador Interno)



Prof. Dr. MARCIO LELES ROMARCO DE OLIVEIRA (Universidade Federal
dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM);
(Examinador Externo)

Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA (Departamento de Engenharia
Florestal – EFL/UnB).
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 23 de janeiro de 2018.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SSO676m Soares, Kálita Luis
Modelagem de afilamento e otimização de multiprodutos para curta rotação de eucalipto em diferentes espaçamentos / Kálita Luis Soares; orientador Mauro Eloi Nappo; co orientador Renato Vinicius Oliveira Castro. -- Brasília, 2018.
75 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Florestais)
- Universidade de Brasília, 2018.

1. Manejo Florestal. 2. Silvicultura. 3. Modelagem de afilamento. 4. Mensuração Florestal. 5. Multiprodutos. I. Nappo, Mauro Eloi, orient. II. Castro, Renato Vinicius Oliveira, co-orient. III. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOARES, K. L. (2018). **Modelagem de afilamento e otimização de multiprodutos para curta rotação de eucalipto em diferentes espaçamentos**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-304/2018. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75 f.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Kálita Luis Soares

TÍTULO: Modelagem de afilamento e otimização de multiprodutos para curta rotação de eucalipto em diferentes espaçamentos.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Kálita Luis Soares
soares-kalita@hotmail.com

Dedico

*Aos meus pais, Paulina e Luis,
Ao meu irmão Gustavo,
por serem tudo em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Senhor, por todas infinitas bênçãos em minha vida, por ter chegado, pois sem Ele eu não seria nada.

Aos meus Pais, Luis e Paulina, por todo amor, por serem minha inspiração de vida, minha base de tudo e por sempre terem me ajudado, apoiado e estarem ao meu lado para tudo.

Ao meu irmão Gustavo, por todo amor, incentivo e apoio em tudo.

Ao meu orientador Mauro Eloi Nappo, por todos os ensinamentos, pelos incentivos na vida profissional e os grandes conselhos de vida passados, serei eternamente grata.

Ao meu coorientador Renato Castro, por ter me recebido tão bem na Universidade em Sete Lagoas, por toda aprendizagem nesse tempo em que estive lá, e por todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Maria Tereza, Matheus e José Eduardo que pude dividir república no início do Mestrado e estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis.

A Universidade Federal de São João Del-Rei pela oportunidade de ter estado um tempo no Campus de Sete Lagoas, por ter enriquecido meus conhecimentos, e a pessoa da Vanessa quem sempre me ajudou na Universidade e enquanto estive em Sete Lagoas e se tornou uma grande amiga. Ao Lidiomar, que foi um grande amigo que a vida me presenteou na minha passagem por Sete Lagoas.

A todas as pessoas que a Pós-Graduação me proporcionou conhecer, e que de menor que seja contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal. De modo especial, a Mirella, que compartilhamos o mesmo orientador, e que foi uma companheira durante todo o tempo em que trabalhamos no experimento, e grandes aprendizados foram passados.

A Elian, que foi uma pessoa que pude conhecer e estive ao meu lado em Brasília nos momentos mais complicados, se tornou uma amiga que guardarei sempre.

A todas as pessoas da minha família, que mesmo longe me apoiaram e estiveram torcendo por mim.

Muito obrigada!!

Filho,
não esqueça os meus ensinamentos;
lembre sempre dos meus conselhos.
Os meus ensinamentos lhe darão
uma vida longa e cheia de sucesso.
Não abandone a lealdade e a fidelidade;
guarde-as sempre bem gravadas no coração.
Se você fizer isso, agradará tanto a DEUS
como aos seres humanos.
Confie no SENHOR de todo o coração
e não se apoie na sua própria inteligência.
Lembre de DEUS em tudo o que fizer,
e ele lhe mostrará o caminho certo.
Não fique pensando que você é sábio;
tema o SENHOR e não faça nada que seja errado.

Provérbios 3:1-7

RESUMO

MODELAGEM DE AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS PARA CURTA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

Autora: Kálita Luis Soares

Orientador: Prof. Dr. Mauro Eloi Nappo

Coorientador: Prof. Dr. Renato Vinícius Oliveira Castro

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília-DF, 23 de janeiro de 2018.

Diante da necessidade de informações sobre a forma do fuste das árvores submetidas à diferentes prescrições silviculturais, este estudo objetivou estudar os perfis dos fustes de árvores de Eucalipto, em diferentes espaçamentos e idades, e selecionar o melhor modelo de afilamento para quantificação de multiprodutos de tais fustes. Foram utilizados dados de um experimento sistemático em leque, composto por três leques completos e com 12 tratamentos (espaçamentos) cada. Os 12 tratamentos analisados apresentam as seguintes áreas úteis por árvore em cada espaçamento: E1 (0,50 m²); E2 (0,77 m²); E3 (1,17 m²); E4 (1,76 m²); E5 (2,64 m²); E6 (3,94 m²); E7 (5,86 m²); E8 (8,69 m²); E9 (12,86 m²); E10 (19,00 m²); E11 (28,01 m²); E12 (41,25 m²). Os tratamentos foram avaliados em três diferentes idades (16, 24 e 36 meses). Os dados foram utilizados para o ajuste dos modelos de Kozak, Demaerschalk e Garay. Foram ajustados os modelos para todos os tratamentos em cada idade. A escolha foi feita com base nas estatísticas: coeficiente de correlação, erro-padrão da estimativa relativo e da análise gráfica dos resíduos. Fator de forma foi calculado a partir da estimativa de diâmetros pelo modelo selecionado. Foi realizada otimização dos fuste para conversão em multiprodutos pelo modelo de Kozak e proposto o melhor aproveitamento para cada espaçamento. Testes de identidade de modelos foram aplicados no modelo de Kozak com a finalidade de verificar a semelhança entre os espaçamentos nas diferentes idades, apresentando quais espaçamentos podem ter uma mesma equação ajustada. Verificou-se que há semelhança entre os grupos que apresentam valores de áreas úteis por árvore mais próximos, apresentando que estes podem utilizar uma mesma equação para descrever o perfil do fuste. O modelo de Kozak foi o mais indicado para descrever o afilamento dos fustes de *Eucalyptus*. Espaçamentos mais adensados apresentam fuste mais cilíndricos, e espaçamentos menos adensados fustes mais cônicos. Para todos os espaçamentos com aumento da idade os fuste tendem a ficar mais cônicos. Maior produção volumétrica pode ser encontrada em plantios com espaçamentos mais adensados, devido ao maior número de indivíduos por hectare. Um melhor retorno financeiro pode ser obtido quando conduzido o povoamento para produção de multiprodutos em comparação a uso único de lenha.

Palavras chave: Arranjo espacial, *taper*, fator de forma, Identidade de modelo, *Eucalyptus*, múltiplos produtos, sortimento.

ABSTRACT

***EUCALYPTUS* SHARPENING MODELING IN DIFFERENT PLANTING SPACES AND OPTIMIZATION OF MULTIPRODUCTS FOR SHORT ROTATION**

Author: Kálita Luis Soares

Advisor: Prof. Dr. Mauro Eloi Nappo

Co-advisor: Prof. Dr. Renato Vinícius Oliveira Castro

Post graduate program in Forest Sciences

Brasília-DF, 23 January of 2018

In view of the need for information on the shape of the tree stem submitted to different silvicultural prescriptions, this study aimed to study the profiles of the Eucalyptus trees, in different spacing and age, and to select the best model for the quantification of multiproducts of such trunks. Data from a systematic fan experiment, composed of three complete fans and 12 treatments (spacing) were used. The 12 treatments analyzed present the following useful areas per tree in each spacing: E1 (0,50 m²); E2 (0,77 m²); E3 (1,17 m²); E4 (1,76 m²); E5 (2,64 m²); E6 (3,94 m²); E7 (5,86 m²); E8 (8,69 m²); E9 (12,86 m²); E10 (19,00 m²); E11 (28,01 m²); E12 (41,25 m²). Treatments were evaluated at three different ages (16, 24 and 36 months). The data were used to fit the Kozak, Demaerschalk and Garay models. The models were adjusted for all treatments at each age. The choice was made based on the statistics: correlation coefficient, standard error of the relative estimate and the graphic analysis of the residues. Form factor was calculated from the estimation of diameters by the selected model. Optimization of the bole for conversion into multiproducts was made by the Kozak model and proposed the best use for each spacing. Model identity tests were applied in the Kozak model in order to verify the similarity between the different age spacings, showing which spacing can have the same adjusted equation. It was verified that there is similarity between the groups that present values of useful areas by tree closer, presenting that they can use a same equation to describe the profile of the shaft. The Kozak model was the most suitable to describe the tapering of the Eucalyptus ridges. More denser spacings have more cylindrical shanks, and less denser spacing have more conical stems. For all spacings with increasing age the stem tend to become more conical. Greater volumetric production can be found in plantations with denser spacings, due to the greater number of individuals per hectare. A better financial return can be obtained when conducting settlement for multiproduct production compared to single use of firewood.

Keywords: Space arrangement, taper, form factor, Model identity, Eucalyptus.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1. Importância do gênero <i>Eucalyptus</i> para a silvicultura brasileira.....	15
2.2. Efeito do espaçamento na produtividade e forma da árvore	16
2.3. Delineamento sistemático tipo “leque”	17
2.4. Modelos de afilamento e multiprodutos	18
3. ÁREA DE ESTUDO	20
3.1 Experimento em delineamento sistemático tipo “leque”	20
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
CAPÍTULO I.....	30
AFILAMENTO DO FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS E IDADES	30
1. INTRODUÇÃO.....	31
2. MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1 Ajustes e seleção dos modelos	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4. CONCLUSÃO	51
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
CAPÍTULO II	56
OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS DE POVOAMENTO DE EUCALIPTO DE CURTA ROTAÇÃO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS.....	56
1. INTRODUÇÃO.....	57
2. MATERIAL E MÉTODOS	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4. CONCLUSÃO	73
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores do raio inicial (r_0), raios dos tratamentos (r_1 a r_n) ângulo entre os raios (θ) e área associada a cada árvore (A_1 a A_n) no delineamento sistemático tipo “leque”. Adaptado de Stape (1995).....	21
Figura 2. Croqui do experimento em delineamento sistemático tipo “leque” com 12 tratamentos e 36 repetições com híbrido de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	22
Figura 3. Localização geográfica da área de estudo ($15^{\circ} 58' 89''S$ e $47^{\circ} 54' 52''O$), Brasília-DF, imagem obtida no programa Google Earth – Data da imagem: 5 de março de 2017.	32
Figura 4. Distribuição dos resíduos e frequência percentual dos erros em função do diâmetro sem casca observado (d) para os modelos ajustados, considerando-se todos os espaçamentos em todas as idades.	40
Figura 5. Análise gráfica dos resíduos para a variável diâmetro (d) sem casca referente ao ajuste do modelo de Kozak para os tratamentos 1 ao 6, em cada idade.	42
Figura 6. Análise gráfica dos resíduos para a variável diâmetro (d) sem casca referente ao ajuste do modelo de Kozak para os tratamentos 7 ao 12, em cada idade.	43
Figura 7. Estimativas dos perfis dos fustes das árvores médias referentes ao ajuste do modelo de Kozak em diferentes espaçamentos, para cada idade avaliada.	47
Figura 8. Tendência dos valores de fator de forma médio da árvore completa apresentada pelos espaçamentos em cada idade.	50
Figura 9. Quantidade de peças estimadas por hectare obtidas na otimização do fuste em multiprodutos para os espaçamentos 1 ao 4, em todas as idades.....	65
Figura 10. Quantidade de peças estimadas por hectare obtidas na otimização do fuste em multiprodutos para os espaçamentos 5 ao 8, em todas as idades.....	66
Figura 11. Quantidade de peças estimadas por hectare obtidas na otimização do fuste em multiprodutos para os espaçamentos 9 ao 12, em todas as idades.....	67
Figura 12. Volume total de lenha (m^3) por hectare para cada espaçamento, nas três idades (16, 24 e 36 meses) obtido na otimização dos fustes em multiprodutos.....	68
Figura 12. Volume total estimado para a produção de biomassa do povoamento por hectare e volume total estimado dos multiprodutos por hectare obtidos a partir da otimização.	69
Figura 13. Tendência das estimativas de volume individual (m^3) por árvore (A) e volume total do povoamento (m^3/ha) por hectare (B) para todos os espaçamentos em cada idade.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da distância radial, área por árvore e densidade de árvores para 12 tratamentos (espaçamentos) no delineamento sistemático tipo “leque”.....	21
Tabela 2. Estatísticas descritivas para as variáveis Diâmetro a altura de 1,30 do solo (DAP) e Altura total (H) das árvores para cada tratamento, em todas as idades.....	35
Tabela 3. Estimativas dos parâmetros dos modelos para cada tratamento em cada idade e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade do ajuste.....	37
Tabela 4. Resultados pela estatística F e seus respectivos p-valor referentes ao teste de identidade na equação do modelo de Kozak.....	45
Tabela 5. Fator de forma médio para cada espaçamento, em cada idade.....	48
Tabela 6. Especificações dos produtos e suas dimensões, definidos para o sortimento de multiprodutos.....	60
Tabela 7. Estimativas dos parâmetros do modelo de Schumacher e Hall modificado para cada tratamento em cada idade e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade do ajuste.....	62
Tabela 8. Estimativas dos parâmetros do modelo de Kozak para cada tratamento em cada idade e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade do ajuste.....	62
Tabela 9. Estimativa média de volume (m ³) por árvore individual e estimativa de volume (m ³) por hectare para cada espaçamento, em cada idade.....	70
Tabela 10. Estimativa da Receita Total por hectare para o povoamento convertido em multiprodutos ou em lenha.....	72

1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor brasileiro de árvores plantadas é, atualmente, uma referência mundial por sua atuação pautada pela sustentabilidade, competitividade e inovação (IBÁ, 2017). De acordo com o Relatório Anual 2017 da Indústria Brasileira de Árvores, o Brasil está entre os principais produtores de celulose, papel e painéis de madeira no mundo, com grande número de exportações que trazem contribuição direta na balança comercial e geram muitos empregos e renda em todas as regiões do País.

De acordo com o Relatório Anual de Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS apresentado pelo IBGE, em relação as florestal plantadas, os produtos madeireiros respondem por 97,7% do valor de produção do setor em 2016, com destaque para o segmento de madeira para papel e celulose, que cresceu 7,7%, somando R\$ 5,2 bilhões no ano, valor que representa 37,1% do produzido nas áreas de florestas plantadas brasileiras (IBGE, 2017).

No final do ano de 2016 a área de maciços florestais plantados no Brasil totalizou 10.023.076 hectares, incremento de 0,9% em relação ao ano anterior. A área plantada com eucalipto corresponde a 7.543.707 hectares, representando 75,3% do total (IBGE, 2017).

Segundo o Serviço Florestal Brasileiro através do Boletim do Sistema Nacional de Informações Florestal - SNIF (2017), do total de madeira em tora extraída no ano de 2016 para uso industrial direcionada para papel e celulose, 80,2% são provenientes de eucalipto (68.316.790m³). A produção nacional de lenha da silvicultura alcançou 53 297 902 metros cúbicos em 2016, apresentando valor de produção de R\$ 2,2 bilhões (IBGE, 2017).

Na condução da implantação de povoamentos de eucalipto, as práticas silviculturais tem efeitos diretos no crescimento das árvores e, conseqüentemente, nas propriedades do fuste e da madeira e na produção final do povoamento. Dentre as diversas práticas silviculturais utilizadas para o manejo de florestas plantadas, pode-se destacar: a escolha da espécie; preparo do solo; escolha do espaçamento; os cortes silviculturais, desrama e desbaste entre outros.

O espaçamento influencia diretamente o crescimento individual da árvore, mas também influencia o crescimento em conjunto de todas as árvores no povoamento (STAPE, 1995).

Estudos para avaliação de diferentes espaçamentos para espécies florestais, os quais demandam ensaios experimentais em campo, necessitam de extensas áreas para sua instalação (MORAES et al., 2013). Uma alternativa para dificuldades quanto a instalação desses ensaios experimentais é o uso do delineamento sistemático em “leque” proposto por Nelder (1962), o qual permite avaliar um maior número de espaçamentos possíveis (incluindo espaçamentos extremos) em menores áreas experimentais, possibilitando a seleção do melhor espaçamento de plantio (ODA-SOUZA et al., 2008).

A densidade do povoamento influencia significativamente a forma do fuste (SCHONAU; COETZEE, 1989). Conforme Baldwin et al. (2000) é esperado que árvores plantadas em maiores espaçamentos iniciais apresentem fustes mais cônicos, em comparação com árvores sob espaçamentos menores.

Árvores com mesmos valores de diâmetro e altura total, conduzidos em espaçamentos menores proporcionam volumes maiores, porque apresentam fuste com a forma menos cônica que quando conduzidos em espaçamentos maiores (NOGUEIRA et al., 2008). Este fato tem conduzido diversos pesquisadores a desenvolverem estudos sobre a forma das árvores objetivando alcançar maior acurácia na estimativa de volumes totais e, ou, parciais dos fustes (SCOLFORO, 2005).

Dentre as alternativas para quantificar e expressar a forma do fuste de árvores podem ser considerados: o fator de forma, o quociente de forma, as funções *spline* e os modelos de afilamento ou *taper* (SCOLFORO et al., 1998; HUSCH et al., 2003).

A função de afilamento ou *taper* é uma descrição matemática do perfil longitudinal de um tronco (AHRENS; HOLBERT, 1981). Diversos modelos de afilamento são apresentados para descrever o afilamento dos fustes para diferentes espécies (KOZAK et al., 1969; SCHOEPFER, 1966; GARAY, 1979; DEMAERSCHALK, 1972; ORMEROD, 1973). Assim, posterior definição do modelo matemático para o afilamento, pode-se determinar o volume de madeira entre quaisquer pontos ao longo do tronco.

Segundo Horle et al. (2010), as funções de afilamento podem estimar os diâmetros mínimos e máximos comerciais e conseqüentemente o número de toras produzidas. O estudo da forma é fundamental para determinar e identificar os sortimentos do fuste e do povoamento (FINGER et al., 1995).

A escolha da produção final da floresta tem efeitos na rentabilidade financeira que possa ser obtida. Uma alternativa para destinação final da produção da floresta é a conversão dos fustes em multiprodutos, podem gerar um maior retorno financeiro quando comparado a destinação de um único uso para a floresta (SOARES et al., 2003).

Em resposta as vantagens proporcionadas pela conversão de árvores em multiprodutos, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer o melhor aproveitamento na conversão de troncos (SILVA et al., 1999; SOARES et al., 2003; CASTRO et al., 2011; CAMPOS et al., 2014).

Diante da demanda por madeira e conseqüentemente exploração dos produtos oriundos de florestas plantadas, torna-se necessário a quantificação dos estoques florestais de forma acurada e precisa. Assim, tornando-se cada vez mais importante o emprego de técnicas adequadas de inventário e manejo florestal com a finalidade de se realizar um diagnóstico mais completo e detalhado da produção.

Devido a influência significativa do espaçamento na produtividade e forma da árvore, interferindo diretamente na conversão de sortimentos dos fustes, é imprescindível estudos detalhados acerca do afilamento dos fustes das árvores para posterior conversão em multiprodutos.

Diante do exposto, o estudo teve por objetivo geral avaliar a influência de diferentes espaçamentos de plantio inicial ao longo do tempo na forma do fuste de árvores de eucalipto e posterior otimização da madeira para curta rotação, visando a conversão dos fustes em multiprodutos.

A fim de atingir o objetivo acima proposto, a dissertação foi estruturada em dois capítulos, sendo que cada capítulo encontra-se na forma de artigo científico, titulados conforme apresentado a seguir:

- Capítulo I: Afilamento do fuste de árvores de eucalipto em diferentes espaçamentos e idades.

- Capítulo II: Otimização de multiprodutos para curta rotação de povoamento de eucalipto em diferentes espaçamentos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Importância do gênero *Eucalyptus* para a silvicultura brasileira

O Eucalipto como popularmente conhecido é pertencente à família Myrtaceae, apresentando três gêneros: *Eucalyptus* com aproximadamente 746 espécies, *Corymbia* com aproximadamente 113 espécies e *Angophora* com aproximadamente 9 espécies. O gênero *Eucalyptus* tem a sua origem na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. Dentre as 746 espécies reconhecidas botanicamente, não mais que 20 delas são utilizadas para fins comerciais em todo o mundo (SANTAROSA et al., 2014).

Os primeiros estudos com o eucalipto no Brasil só foram iniciados em 1904, por Edmundo Navarro de Andrade, no Horto Florestal de Rio Claro, SP, pertencente à ex-Companhia Paulista de Estradas de Ferro (MARTINI, 2004). Entretanto, o crescimento da área reflorestada no País foi realmente marcante somente a partir da promulgação da Lei de Incentivos Fiscais ao Reflorestamento, Lei no 5.106 de 1966. A eucaliptocultura pôde consolidar-se também graças ao Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND), criado pelo Governo Federal, em meados da década de 1970 (SANTAROSA et al., 2014).

Dentre as inúmeras espécies arbóreas existentes, o eucalipto, devido as características de rápido crescimento, produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade de adaptação e por ter aplicação para diferentes finalidades tem sido extensivamente utilizado em plantios florestais (MORA; GARCIA, 2000).

Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares, aproximadamente 73% da área total de árvores plantadas do Brasil e estão localizados, principalmente, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). Nos últimos cinco anos, o crescimento da área de eucalipto foi de 2,4% ao ano (SNIF, 2017).

As espécies mais utilizadas para plantios no Brasil, em função das características de suas madeiras, são: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus dunnii* (SANTAROSA et al., 2014).

A indústria brasileira de base florestal é mundialmente reconhecida pela alta produtividade de suas áreas plantadas. Em 2016, o Brasil liderou o ranking global de produtividade florestal, com uma média de 35,7 m³/ha ao ano para os plantios de eucalipto (IBÁ, 2017).

A cultura do *Eucalyptus* no Brasil é de grande relevância, vem contribuindo de forma crescente para a geração de emprego e renda no meio rural e urbano, inclusive com participação expressiva na balança comercial, destacando-se nesse contexto a celulose e o papel como principais produtos destinados ao mercado externo (EMBRAPA, 2014).

2.2. Efeito do espaçamento na produtividade e forma da árvore

A forma do tronco de uma árvore pode ser geometricamente descrita como um neilóide na base, um parabolóide no meio e um cone na extremidade final, não sendo possível a determinação exata da transição de um sólido para outro sobre o mesmo tronco (HUSCH; MILLER; BEERS, 1972).

A forma do fuste é diretamente influenciada pela densidade do plantio (SCHONAU; COETZEE, 1989; NOGUEIRA et al., 2008). Árvores de povoamentos menos adensados tendem a ter maior afilamento do que árvores de povoamentos mais adensados (SOUZA et al., 2016).

Alguns processos fisiológicos podem ser alterados na árvore devido a influência da densidade de plantio, resultando em transformações na forma da fuste (HENSKENS et al., 2001). Segundo esses mesmos autores, avaliando os efeitos do arranjo de plantio sobre o crescimento e forma de *Eucalyptus globulus* de 3 a 4 anos, observaram que a proporção de biomassa acima do solo encontrada nos caules declinou com espaçamentos maiores, e a massa em folhagem e ramos aumentaram, resultando em uma maior proporção de copa, em resposta fustes mais cônicos.

Espaçamentos mais amplos resultam em um aumento do volume para fins específicos, como serraria, laminação (GOMES et al., 1997).

Ladeira et al. (2001) avaliando o crescimento e a produção de biomassa em três espécies de *Eucalyptus* sob três espaçamentos observou que a predominância de árvores de menores diâmetros nos povoamentos mais densos elevou os custos de produção da madeira, em comparação com aqueles menos densos, com maior proporção de árvores com diâmetro maior, aumentando a rentabilidade da atividade florestal, especialmente quando se adota a prática do uso múltiplo da floresta.

De acordo com Patino-Valera (1986), o espaçamento ótimo é aquele capaz de fornecer o maior volume do produto em tamanho, forma, e qualidade desejáveis, o que depende do sítio, da espécie e do potencial do material genético utilizado.

É indispensável fazer uma análise econômica sobre as condições de mercado antes de fazer a escolha do espaçamento e/ou arranjo de plantio, para determinar qual será o mercado consumidor alvo (produto) da produção florestal, e a partir desta informação traçar o objetivo da produção e o manejo a ser aplicado no povoamento. Assim, pode-se dizer que o produto final desejado é o fator que determina o espaçamento de plantio a ser adotado (OLIVEIRA NETO et al., 2003).

2.3. Delineamento sistemático tipo “leque”

A partir da introdução dos conceitos de repetição, casualização e controle local propostos por Fisher, utilizados como princípios básicos da estatística experimental, trouxe avanços para as bases teóricas na estatística para pesquisas experimentais e científicas. Contudo, as exigências de experimentos propostos por Fisher podem limitar o número ou tamanho de ensaios, devido as dificuldades relativas à disponibilidade de área e de recursos para instalação, manutenção e avaliação (ODA, 2005), principalmente para espécies florestais.

Os experimentos com ensaios em campo envolvendo espécies florestais para conhecimento do crescimento e produção geralmente ocupam grandes áreas por serem espécies de grande porte, acarretando na necessidade de locais maiores para desenvolvê-los (MORAES et al., 2013). Com o objetivo de superar as limitações inerentes aos delineamentos experimentais tradicionais, Nelder (1962) propõe, como alternativa, os delineamentos sistemáticos tipo “leque” o qual tem sido empregado em diversos trabalhos com ensaios de campo (STAPE, 1995; ODA-SOUZA et al., 2008; STAPE e BINKLEY, 2010; SANTOS, 2011; MORAES et al., 2013; VANCLAY et al., 2013).

Dentre os cinco delineamentos sistemáticos propostos por Nelder (1962), destaca-se o tipo “leque”, formado por um sistema de raios e arcos de círculos concêntricos, onde a retangularidade (razão entre as distâncias inter e intra linhas) é constante.

O delineamento caracteriza-se em definir os valores do raio inicial r_0 (distância do ponto central do círculo à bordadura interna), a razão da progressão geométrica dos raios ou fator de espaçamento (α), o ângulo entre os mesmos (θ) e a área (A_i) entre as plantas (NELDER, 1962; STAPE, 1995).

O delineamento sistemático tipo “leque” permite avaliar um maior número de espaçamentos (incluindo espaçamentos extremos) em áreas experimentais menores (STAPE, 1995), obtendo um banco de dados com maior proporção de informações quando comparado aos experimentos casualizado (STAPE; BINKLEY, 2010).

Stape (1995) em estudo de espaçamentos florestais, avaliando um experimento em delineamento sistemático em “leque”, conforme proposto por Nelder, de *Eucalyptus dunnii*, comparando a um experimento clássico de blocos casualizado, concluíram que os dois experimentos reproduzem as mesmas respostas do efeito do espaçamento nas árvores, apresentando a vantagem do uso deste delineamento para experimentos florestais com instalação em menor área.

Stape e Binkley (2010) avaliando a influência do espaçamento sobre árvores de origem semental de *Eucalyptus dunnii* entre um experimento clássico replicado em quatro blocos (espaçamento das árvores de 4,5 a 9,2 m²/árvore, cobrindo 1,4 ha de área) e um experimento em delineamento sistemático em “leque” (espaçamento das árvores de 2,1 a 44,0 m²/árvore, cobrindo

0,6 ha de área) também obtiveram resultados de resposta das árvores essencialmente similares entre os dois experimentos.

O delineamento sistemático em “leque” pode ser utilizado para avaliação da influência do arranjo espacial sobre a árvore individualmente e a produção do povoamento obtendo resultados precisos (ODA-SOUZA et al., 2008).

2.4. Modelos de afilamento e multiprodutos

Os modelos chamados funções de afilamento, também conhecidas como, funções de *taper*, modelos de perfil ou funções de forma, são uma maneira de descrever matematicamente o perfil de um fuste (AHRENS; HOLBERT, 1981).

Campos e Leite (2013) define “*taper*” como termo aplicado ao decréscimo do diâmetro ao longo do fuste. Havendo definida regularidade na mudança desse diâmetro, o perfil do tronco pode ser expresso por funções denominadas funções de *taper*.

Os modelos de afilamento ou funções de *taper* são equações utilizadas para descrever o perfil do fuste, estimando o valor do diâmetro a qualquer altura ao longo do tronco, determinar a qual altura um determinado diâmetro ocorre e o volume de seções do tronco, sendo uma ferramenta fundamental para quantificar multiprodutos de madeira (CAMPOS; LEITE, 2013). Segundo esses mesmos autores a precisão de cada modelo dependerá do objetivo em que será empregado.

A precisão das estimativas obtidas por equações de afilamento pode ser decisiva para o sucesso do processo de otimização, o que tem sido objeto de estudo de vários autores (MENDONÇA et al., 2007; SOUZA et al., 2008; SOUZA, 2009; LEITE et al., 2011; MIGUEL et al., 2011; FIGUEIREDO FILHO et al., 2014; SCHRÖDER et al., 2013; FIGUEIREDO FILHO et al., 2015).

Queiroz et al. (2008) avaliou a acuracidade de três modelos polinomiais não segmentados para estimar diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Mimosa scabrella* por classe diamétrica e idade, e para o conjunto total dos dados.

Chichorro (2000) comparou o modelo de Demaerschalk (1972) com o desenvolvido por Kozak et al. (1969), obtendo como resultado maior precisão da equação de Demaerschalk (1972) para estimar diâmetros ao longo do tronco baseando-se no erro padrão da estimativa para as diversas seções ao longo do tronco.

Cabacinha (2003) utilizou o modelo de Ormerod (1973), modificado por Guimarães & Leite (1992), para estimar os diâmetros a 0,3m de altura e à altura relativa (*dhr*), para utilização do método geométrico. Segundo o autor a opção por este modelo se deveu às suas características de: igualar o diâmetro (*di*) ao DAP quando a altura (*hi*) for igual a 1,30m partindo-se do solo; estimar $di=0$ quando

hi for igual à altura total (ht); fornecer boas estimativas de *taper* e também por possuir apenas duas variáveis independentes.

Kohler et al. (2013) ajustaram modelos de afilamento para *Pinus taeda* e avaliaram a necessidade ou não de desenvolver modelos por classe de idade. Segundo os autores, as equações de afilamento obtidas para as classes de idades apresentaram certa superioridade em relação à equação geral, sugerindo que trabalhar com dados em classes de idade pode proporcionar maior precisão nas estimativas do diâmetro ao longo do tronco.

Figueiredo Filho et al. (2014) avaliaram o desenvolvimento da forma do fuste em *Araucaria angustifolia*. Eles adaptaram um polinômio quinto grau para as classes de idade e as curvas resultantes dos modelos ajustados indicaram uma melhoria na forma do fuste com o aumento da idade.

Campos et al. (2014) avaliaram o efeito do modelo de afilamento sobre a conversão de fustes de eucalipto em multiprodutos. Ajustaram cinco diferentes modelos, observando que o modelo de Garay foi o que teve maior eficiência em estimar os diâmetros ao longo do tronco, apresentando um maior coeficiente de correlação e determinação, e dispersão dos resíduos em torno da média. Porém, quando utilizou os modelos de afilamento para a conversão das árvores em multiprodutos, o modelo de Kozak apresentou maior rendimento (m^3/ha) e maior receita (R\$/ha). Os resultados enfatizam a importância da escolha do modelo de afilamento a ser usado para tal finalidade.

Kohler et al. (2016) desenvolveram estudo avaliando a evolução do afilamento dos fustes de árvores em povoamentos de *Pinus taeda*. Foi ajustado um polinômio de potências inteiras e fracionárias para estimativa dos diâmetros sem casca ao longo do tronco e usado para construção de curvas de afilamento por classe de idade. As curvas construídas a partir das funções de afilamento ajustadas e os fatores de forma mostram que os troncos se tornam mais cilíndricos com o aumento da idade e, quando ajustado por classes de idade pode produzir estimativas mais acuradas do sortimento.

O grande número de informações que podem ser obtidas pelos modelos de afilamento e suas grandes aplicações para estimar sortimentos florestais têm levado ao desenvolvimento de diferentes modelos, os quais buscam uma representação fiel do perfil do fuste (KOZAK et al., 1969; DEMAERSCHALK, 1972; ORMEROD, 1973; GOULDING e MURRAY, 1976; GUIMARÃES e LEITE, 1992; GARCIA et al., 1993; LEITE e GARCIA, 2001; dentre outros). Entre os diversos modelos utilizados para descrição dos perfis dos fustes, Campos e Leite (2013) afirmam que o modelo de *taper* mais difundido no Brasil é o de Kozak, devido sua facilidade de ajustamento, possuindo a vantagem de modelar todo o fuste com uma única função e apresentando precisão nas estimativas.

3. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em Brasília, Distrito Federal, na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB), a qual possui uma área total de 4.390 ha. A vegetação predominante é o Cerrado *sensu stricto* sobre Latossolo Vermelho.

A altitude média da região é de 1.100 m, com latitude 15° 56' 40'' sul e longitude de 47° 56' 52'' oeste. O clima local é classificado, segundo critérios de Köppen (1936), como Aw, denominado clima tropical de inverno seco e verão chuvoso. A precipitação anual média é de 1.600 mm, com uma pronunciada estação seca de junho a setembro. A temperatura média anual é de 21°C (MUNHOZ et al, 2008).

3.1 Experimento em delineamento sistemático tipo “leque”

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de um experimento de espaçamento do híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (denominado comercialmente de clone EAC 1528) instalado em um delineamento sistemático tipo “leque” conforme proposto por Nelder (1962), tendo sido implantado em 11/12/2013.

Assim como descrito por Nelder (1962) e explanado por Stape (1995) este delineamento se caracteriza ao definirem-se os valores do raio inicial r_0 (distância do ponto central do círculo à bordadura interna), a razão da progressão geométrica dos raios ou fator de espaçamento (α), o ângulo entre os mesmos (θ) e a área (A_i) entre as árvores (Figura 1). Desta forma, obtiveram-se os seguintes valores para as características do delineamento sistemático em “leque”: $r_0 = 2,80$ m, $\alpha = 1,11$ e $\theta = 10^\circ$. A partir desses valores o delineamento ficou definido e apresentando os valores de área vital (m^2 árvore⁻¹), distância radial (m) e densidade (árvores ha⁻¹), conforme apresentado na Tabela 1.

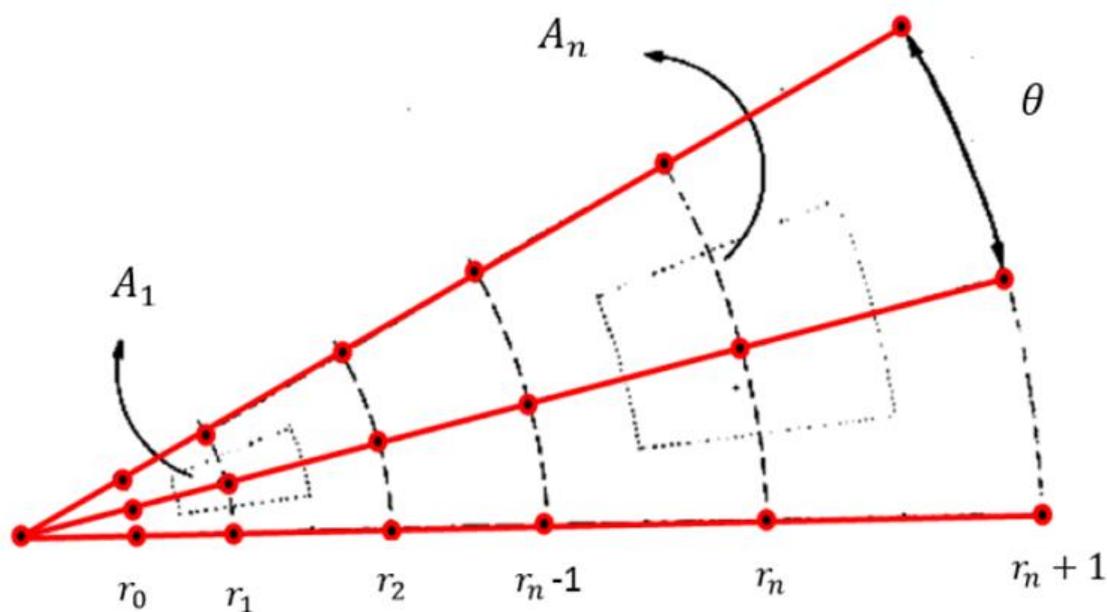


Figura 1. Valores do raio inicial (r_0), raios dos tratamentos (r_1 a r_n) ângulo entre os raios (θ) e área associada a cada árvore (A_1 a A_n) no delineamento sistemático tipo “leque”. Adaptado de Stape (1995).

Tabela 1. Valores da distância radial, área por árvore e densidade de árvores para 12 tratamentos (espaçamentos) no delineamento sistemático tipo “leque”.

Tratamentos	Distância radial (m)	Área Vital ($\text{m}^2 \text{árvore}^{-1}$)	Densidade (árvores ha^{-1})
1	3,59	0,50	20.000,00
2	4,56	0,77	12.987,01
3	5,73	1,17	8.547,01
4	7,14	1,76	5.681,82
5	8,85	2,64	3.787,88
6	10,92	3,94	2.538,07
7	13,42	5,86	1.706,48
8	16,45	8,69	1.150,75
9	20,11	12,86	777,6
10	24,55	19,00	526,32
11	29,91	28,01	357,02
12	36,40	41,25	242,42

O experimento é composto por três leques (círculos) completos idênticos em que cada um perfaz uma área circular de 0,62 ha e uma área quadrada de 0,78 ha. Na Figura 2 tem-se o croqui do experimento, o qual possui 12 espaçamentos (arcos) e 36 repetições (árvores/arco). O primeiro e o último arco foram desconsiderados, pois são respectivamente, uma bordadura interna com raio de 2,80 m e uma bordadura externa com raio de 44,26 m.

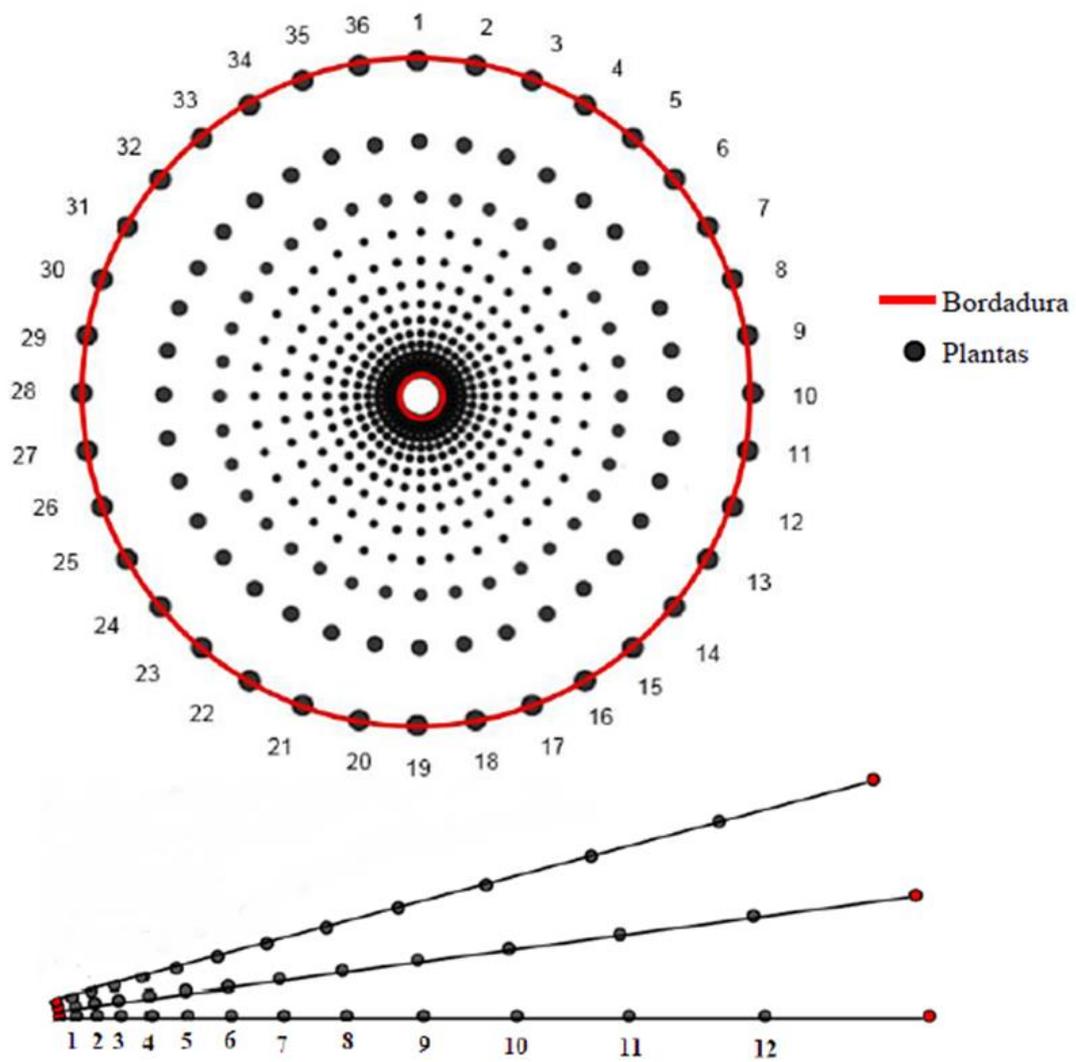


Figura 2. Croqui do experimento em delineamento sistemático tipo “leque” com 12 tratamentos e 36 repetições com híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, S.; HOLBERT, D. Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L. **Boletim de pesquisa florestal**, Colombo, n.3, p.37-68, 1981.

BALDWIN JR., V. C.; PETERSON, K. D.; CLARK III, A.; FERGUSON, R. B.; STRUB, M. R.; BOWER, D. R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old Loblolly Pine. **Forest Ecology and Management**, v. 137, n. 1/3, p. 91-102, 2000.

CABACINHA, C. D. Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa. 2003. 166 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. 4ªed.: Editora UFV. Viçosa-MG, 2013. 605p.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de árvores em multiprodutos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 513-520, 2014.

CASTRO, R. V. O.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SOARES, C. P. B.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; CASTRO, A. F. N. M.; CRUZ, J. P.; SANTOS, F. L.; SOUZA, C. C. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 351-357, 2011.

CHICHORRO, J. F. Análise estrutural e econômica de multiprodutos da madeira em florestas naturais. 2000. 241p. **Tese** (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

DEMAERSCHALK, J. P. Integrated systems for the estimation of tree taper and Volume. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v.3, n.90, p.90-94, 1972.

EMBRAPA - SISTEMAS DE PRODUÇÃO EMBRAPA (2014). Cultivo do Eucalipto. Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 03 de janeiro de 2018.

FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; FELDE, J. L.; DIAS, A. N. Dinâmica do afilamento do tronco e da produção de madeira em plantios de *Araucaria angustifolia*. **Cerne**, Lavras, v.20, n.4, p.595-603, 2014.

FIGUEIREDO FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; KOHLER, S. V.; BECKER, M.; BRANDES, D. Efeito da idade no afilamento e sortimento em povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.22, n.1, p.50-59, 2015.

FINGER, C.A.G., ZANON, M.L.B., SCHNEIDER, P.R.; KLEIN, J. E. M.; COELHO, M. C. B. Funções de forma para *Eucalyptus dunnii* Maiden implantados na depressão central e encosta do sudeste do Rio Grande do Sul. Santa Maria - RS. **Ciência Rural**, v.25, n.3, p. 399-403, 1995.

GARAY, L. Tropical forest utilization system. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. **Seattle: Coll. Forest Res.**, Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p.

GARCIA, S. L. R.; LEITE, H. G.; YARED, J. A. G. Análise do perfil do tronco de morototó (*Didymopanax morototonii*) em função do espaçamento. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. Anais... Curitiba: SBS/SBEF, p.485-491. 1993.

GOMES, F. G.; MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R. Avaliação da produção em volume total e sortimento em povoamentos de *Pinus Taeda* L. submetidos a diferentes condições de espaçamento inicial e sítio. **Ciência Florestal**, v. 7, n. 1, p. 101-126, 1997.

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, v.5, n.3, p.313-322, 1976.

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

HENSKENS, F. L.; BATTAGLIA, M.; CHERRY, M. L.; BEADLE, C. L. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*, **Trees**, v. 15, p. 365-377, 2001.

HORLE, D. C.; MENDONÇA, A. R.; CARVALHO, S. P. C., CALEGARIO, N. Modelagem não linear do perfil longitudinal de fustes de *Pinus oocarpa*. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 2, p. 177-184, 2010.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration**. 4.ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons, 2003. 443p.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. New York: The Ronald Press Company, 2.ed. 1972. 410p.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2017**.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e silvicultura (PEVS)**. Rio de Janeiro: IBGE, v.31, 2017.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. Modelos de Afilamento para *Pinus taeda* por Classes de Idade. **Floresta e Ambiente**; v. 20, n.4, p.470-479, 2013.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. DO A. Evolution of tree stem taper in *Pinus taeda* stands. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.7, p.1185-1191, 2016.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. **Forest Chronicle**, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

LADEIRA, B. C.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos, em uma sequência de idade. **Revista Árvore**, Viçosa, v.25, n.1, p.69-78, 2001.

LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R. Pesquisa e desenvolvimentos em inventário, mensurações e manejo florestal na CENIBRA. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 2001. 49p. (**Relatório Técnico, SIF**).

LEITE, H. G.; NETO, R. R. O.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; BINOTI, M. L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p.53-59, 2011.

MARTINI, A. J. O plantador de eucaliptos: A questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental do legado de Edmundo Navarro de Andrade. **Dissertação** (Mestrado em História Social) – Programa de Pós-Graduação em História Social, Universidade de São Paulo, 2004, 332p.

MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; OLIVEIRA, J. T. S.; NOGUEIRA, G. S.; ASSIS, A. L. Avaliação de funções de afilamento visando à otimização de fustes de *Eucalyptus* sp para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v.13, p. 71-82, 2007.

MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. DO A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptus urophylla* na região norte do Estado de Goiás. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 355-368, 2011.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A Cultura do Eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS), 2000. 112 p.

MORAES, M. A.; DE MORAES, S. M. B., DA SILVA, E. C. B., KUBOTA, T. Y. K., SILVA, A. M., DE RESENDE, M. D. V., MORAES, M. L. T. Variação genética em progênies de *Jacaranda cuspidifolia* Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo “leque”. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 175-183, 2013.

MUNHOZ, C. B. R.; FELFILI, J. M.; RODRIGUES, C. Species-environment relationship in the herb-subshrub layer of a moist Savanna site, Federal District, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v.68, n.1, p.25-35, 2008.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.

NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, n.18, p.283-307, 1962.

ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L.. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 499-509, 2008.

ODA, M. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. 2005. 72f. **Dissertação** (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2005.

OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; 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.

ORMEROD, D. W. A simple bole model. **Forest Chronicle**, Toronto, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

PATINO-VALERA, F. Variação genética em progênies de *Eucalyptus saligna* e sua interação com o espaçamento. 1986. 192f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 1986.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO, F. A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**. v.38, n.2, p.339-349, 2008.

SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. R. Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. Brasília, DF : **Embrapa**, 2014.

SANTOS, M. D. Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 140f. 2011.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stender Waldbestände Schriftenreihe Bad.** [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966.

SCHONAU, A. P. G.; COETZEE, J. Initial Spacing, Stand Density and Thinning in Eucalypt Plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 245-266, 1989.

SCHRÖDER, T.; HOFIÇO, N. A. S.; ZIMMERMANN, A. P. L.; PEREIRA, L. D.; ROCHA JUNIOR, D. S.; MEYER, E. A.; FLEIG, F. D. Métodos de estimativa de volume comercial para *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 73, p. 01-07, 2013.

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. Editora UFLA/FAEPE. Lavras-MG, 2005. 352p.

SCOLFORO, J. R. S., RIOS, M. S., OLIVEIRA, A. D., MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil de *Pinus elliottii*. **Cerne**, Lavras. v. 4, n.1, p. 100-122, 1998.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A.; LEITE, H. G. Rotação econômica em plantações de eucalipto não desbastadas e destinadas a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.23, n.4, p.403-412, 1999.

SNIF-Sistema Nacional de Informações Florestal. Produção Florestal. **Boletim SNIF 2017**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, v. 1, 2017.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.6, p.811-820, 2003.

SOUZA, R. R.; NOGUEIRA, G. S.; MURTA JÚNIOR, L. S.; PELLI, E.; OLIVEIRA, M. L. R.; ABRAHÃO, C. P.; LEITE, H. G. Forma de fuste de árvores de *Eucalyptus* em plantios com diferentes densidades iniciais. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 33-40, 2016.

SOUZA, C. A. M. Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação. 2009. 120 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SOUZA, C. A. M.; CHASSOT, T.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2506-2511, 2008.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with *Eucalyptus* in São Paulo, Brazil. **Southern Forests**. v. 72, p. 91-98, 2010.

STAPE, J. L. Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais. 1995. 104p. **Dissertação** (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

VANCLAY, J. K., LAMB, D., ERSKINE, P. D., & CAMERON, D. M. Spatially explicit competition in a mixed planting of *Araucaria cunninghamii* and *Flindersia brayleyana*. **Annals of forest science**, v. 70, n. 6, p. 611-619, 2013.

CAPÍTULO I

AFILAMENTO DO FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS E IDADES

RESUMO – A forma da árvore é diretamente influenciada pelo espaçamento de plantio, a qual está ligada nos tipos de produtos que podem ser obtidos para cada floresta. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes espaçamentos de plantio inicial ao longo do tempo na forma do fuste de árvores de eucalipto. Foram utilizados dados de um experimento sistemático em leque, composto por três leques completos e com 12 tratamentos (espaçamentos) cada. Os 12 tratamentos analisados apresentam as seguintes áreas úteis por árvore em cada espaçamento: E1 (0,50 m²); E2 (0,77 m²); E3 (1,17 m²); E4 (1,76 m²); E5 (2,64 m²); E6 (3,94 m²); E7 (5,86 m²); E8 (8,69 m²); E9 (12,86 m²); E10 (19,00 m²); E11 (28,01 m²); E12 (41,25 m²). Os tratamentos foram avaliados em três diferentes idades (16, 24 e 36 meses). Os dados foram utilizados para o ajuste dos modelos de Kozak, Demaerschalk e Garay. Foram ajustados os modelos para todos os tratamentos em cada idade. A escolha foi feita com base nas estatísticas: coeficiente de correlação, erro-padrão da estimativa relativo e da análise gráfica dos resíduos. Fator de forma foi calculado a partir da estimativa de diâmetros pelo modelo selecionado. O modelo selecionado foi o de Kozak. Testes de identidade de modelos foram aplicados no modelo de Kozak com a finalidade de verificar a semelhança entre os espaçamentos nas diferentes idades, apresentando quais espaçamentos podem ter uma mesma equação ajustada. Verificou-se que há igualdade entre os espaçamentos avaliados em cada idade, apresentando semelhança entre os grupos que apresentam valores de áreas úteis por árvore mais próximos. O modelo de Kozak foi o mais indicado para descrever o afilamento dos fustes de *Eucalyptus*. Espaçamentos mais adensados apresentam fuste mais cilíndricos, e espaçamentos menos adensados fustes mais cônicos. Para todos os espaçamentos com aumento da idade os fustes tendem a ficar mais cônicos apresentando menor fator de forma.

Palavras-chave: Fator de forma; *Eucalyptus*; arranjo de plantio; *taper*.

1. INTRODUÇÃO

Exigências de mercado de produtos madeireiros e a maximização econômica dos povoamentos florestais tem justificado e estimulado a realização de importantes estudos de otimização dentro do conceito de múltiplos produtos da madeira. Os modelos de afilamento (*taper*) tem se apresentado eficiente para a quantificação e qualificação desses produtos, pois possibilitam a determinação do volume total e comercial de madeira para qualquer diâmetro e, ou comprimento especificado.

Segundo Scolforo (1997), os modelos chamados de funções de afilamento, ou de forma, ou modelos de “*taper*” são uma maneira de descrever matematicamente o perfil de um tronco. Assim, a seção transversal em qualquer posição no tronco é considerada como circular e seu volume é calculado por integração da função.

Campos e Leite (2013) afirmaram existir diversos modelos de regressão que retratam o perfil do fuste da árvore, mas o modelo a ser escolhido está diretamente relacionado aos seus objetivos de aplicação, seja para estimar diâmetros, alturas e volume. Entre os diversos modelos de regressão têm sido propostos e empregados para descrever o afilamento do fuste: Prodan (1965), Demaerschalk (1972), Kozak et al. (1969), Ormerod (1973) e Garay (1979) entre outros (CAMPOS e LEITE, 2013). Esses modelos apresentam a vantagem de modelar todo o fuste com uma única expressão, e também, são relativamente fáceis de ajustar e de empregar (MENDONÇA et al., 2007).

Dentre os diversos fatores que influenciam a forma da árvore, destacam-se a espécie, o sítio, a idade e o espaçamento (SOARES et al., 2007; GONÇALVES et al., 2010; FERREIRA et al., 2014). Diferentes espaçamentos em diferentes idades influenciam a forma das árvores e assim podem influenciar na tomada de decisão visando o melhor uso dos mesmos. O fator de forma de árvores tende a aumentar à medida que se tem menores espaçamentos e árvores plantadas em espaçamentos maiores tendem a ter maior afilamento do que árvores plantadas em espaçamentos menores (BALDWIN et al., 2000; NOGUEIRA et al. 2008; RANCE et al., 2012, SOUZA et al., 2016).

A avaliação da influência do espaçamento de plantio sobre as árvores de espécies florestais exigem grandes áreas experimentais para sua instalação (MORAES et al., 2013). Como alternativa para viabilizar experimentos com grande variação de espaçamentos o delineamento sistemático tipo “leque” proposto por Nelder (1962) permite avaliar um maior número de espaçamentos (incluindo espaçamentos extremos) em áreas experimentais menores (STAPE, 1995), obtendo um banco de dados com maior proporção de informações quando comparado aos experimentos casualizado (STAPE; BINKLEY, 2010) e com resultados precisos e confiáveis (ODA-SOUZA et al., 2008).

Neste sentido, o presente estudo teve por objetivo avaliar a influência de diferentes espaçamentos de plantio ao longo do tempo na forma do fuste de árvores de eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em experimento em delineamento sistemático tipo “leque”, localizado em Brasília, Distrito Federal, na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).

O experimento é composto por três leques (Figura 3) conforme proposto por Nelder (1962), cada um estruturado por 14 espaçamentos (tratamentos) com 36 repetições (arcos), sendo o primeiro e o último arco desconsiderados, pois são respectivamente, uma bordadura interna e uma bordadura externa. Os 12 tratamentos analisados apresentam as seguintes áreas úteis por planta em cada espaçamento: E1 (0,50 m²); E2 (0,77 m²); E3 (1,17 m²); E4 (1,76 m²); E5 (2,64 m²); E6 (3,94 m²); E7 (5,86 m²); E8 (8,69 m²); E9 (12,86 m²); E10 (19,00 m²); E11 (28,01 m²); E12 (41,25 m²).

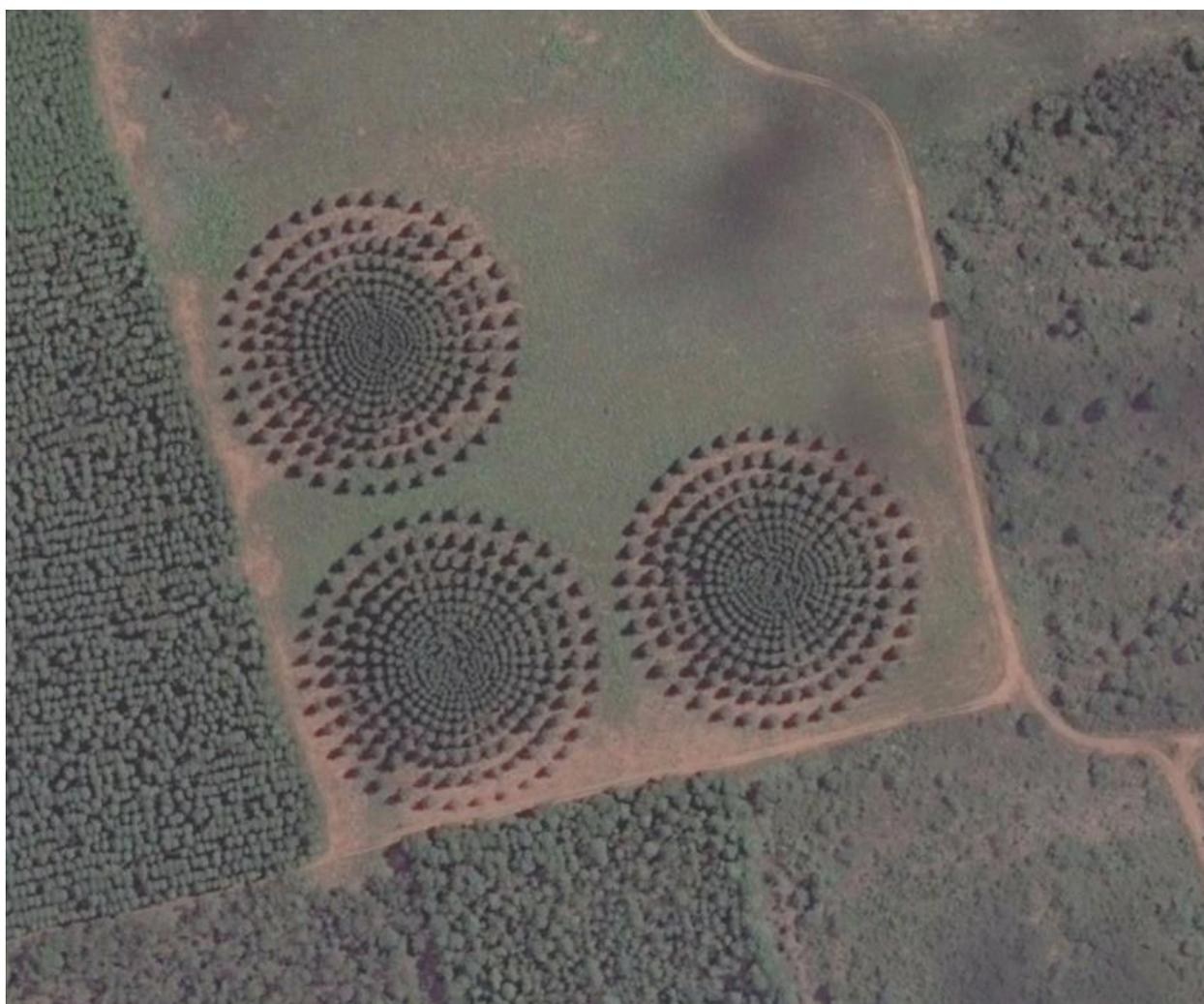


Figura 3. Localização geográfica da área de estudo (15° 58' 89"S e 47° 54' 52"O), Brasília-DF, imagem obtida no programa Google Earth – Data da imagem: 5 de março de 2017.

Para o presente trabalho os dados foram obtidos a partir da cubagem das árvores em pé, sendo coletados os dados de diâmetro em seções de 0,5 m da base do fuste (nível do solo) até a altura de 5

m. Os dados utilizados para todas as análises foram obtidos a partir da mensuração das variáveis dendrométricas dos leques 1 e 2.

A cubagem em pé foi realizada em 5 (cinco) árvores por tratamento (cada espaçamento) em cada leque, totalizando 180 indivíduos. A seleção das árvores que foram cubadas foi baseada na média de DAP em cada tratamento, ou seja, foram selecionadas as cinco árvores que apresentaram o valor igual ou próximo à média aritmética de DAP do tratamento.

Os dados de espessura da casca foram coletados simultaneamente à cubagem. Assim, foram mensuradas a espessura da casca nas seções de 0,5 m da base do fuste (nível do solo) até a altura de 5 metros em todas as árvores-amostra selecionadas para a cubagem.

O banco de dados utilizado para o ajuste dos modelos de afilamento foram obtidos de 3 (três) coletas sucessivas, realizadas nas idades de 16, 24 e 36 meses. Para o ajustes dos modelos de afilamentos foram utilizados os dados dos diâmetros sem casca.

2.1 Ajustes e seleção dos modelos

Os modelos de *taper* foram ajustados para cada espaçamento em cada idade de medição. Os modelos testados foram os desenvolvidos por: Demaerschalk (1972), Kozak et al. (1969) e Garay (1979) apresentando as seguintes relações funcionais:

a) Modelo de Demaerschalk (1972):

$$\left(\frac{d_i}{DAP}\right)^2 = 10^{2\beta_0} DAP^{(2\beta_1-2)} H^{2\beta_2} (H-h)^{2\beta_3} + \varepsilon \quad (1)$$

b) Modelo de Kozak et al. (1969):

$$\left(\frac{d_i}{DAP}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{H}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{H}\right)^2 + \varepsilon \quad (2)$$

c) Modelo de Garay (1979):

$$\left(\frac{d_i}{DAP}\right) = \beta_0 \left(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} H^{-\beta_3})\right) + \varepsilon \quad (3)$$

Em que: β_i = parâmetros a serem estimados; d_i = diâmetro (cm) que ocorre em referida altura h no fuste; DAP = diâmetro (cm) a 1,30 m do solo; h = altura (m) de um referido diâmetro; H = altura total da árvore (m); ε = erro de estimativa.

O ajuste do modelo de Kozak foi feito a partir do método dos mínimos quadrados ordinários e os ajustes dos modelos de Garay e Demaerschalk pelo método iterativo Gauss-Newton, ambos no programa R 3.2.5 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016).

Os resultados dos ajustes dos modelos de afilamento foram avaliados a partir do coeficiente de correlação entre os valores de diâmetros observados e estimados ($r_{y\hat{y}}$), erro-padrão da estimativa

relativo ($S_{yx}\%$), análise gráfica da distribuição dos resíduos e histograma de erro conforme descritas a seguir.

$$r_{y\hat{y}} = \frac{n^{-1}(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2) (n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}, \hat{Y}_m = n^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i; \quad (4)$$

$$S_{yx\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p - 1}}}{\bar{Y}} \times 100 \quad (5)$$

$$Resíduo(\%) = \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)}{Y_i} \times 100 \quad (6)$$

Em que: n = número de observações; Y_i = valores observados para as variáveis; \hat{Y}_i = valores estimados para as variáveis; \bar{Y} = valor médio observado para as variáveis; $n - p - 1$ = grau de liberdade dos resíduos.

A partir do modelo de afilamento selecionado foram realizados testes de identidades de modelos, conforme Regazzi (1999) considerando que dados não possuem dependência espacial, conforme observado por Aquino (2017) nesse mesmo experimento.

Os testes de identidade de modelos foram aplicados a fim de verificar a semelhança entre os espaçamentos nas diferentes idades, apresentando quais espaçamentos podem ter uma mesma equação ajustada.

Para a aplicação do teste de identidade de modelos analisando o diâmetro observado, foram feitas as combinações de todos os espaçamentos, dois a dois, para todas as idades avaliadas.

A partir do modelo selecionado foram estimados diâmetros ao longo do fuste das árvores-amostra por tratamento e idade e calculado o volume total e o fator de forma. Foram elaborados gráficos de tendência do comportamento do fator de forma em relação ao aumento da área útil por árvore na idades avaliadas.

Para comparação das médias dos fatores de forma estimados foi utilizado o teste de agrupamento Scott-Knott a 5% de significância. O Teste tem por objetivo separar as médias em diferentes grupos, por meio da minimização da variação dentro dos grupos e maximização da variação entre grupos (SCOTT; KNOTT, 1974).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição das variáveis Diâmetro a altura de 1,30 do solo (DAP) e Altura total (H) que foram utilizadas para as análises deste estudo estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para as variáveis Diâmetro a altura de 1,30 do solo (DAP) e Altura total (H) das árvores para cada tratamento, em todas as idades.

Idade (meses)	Trat.	DAP (cm)				Altura total (H) (m)			
		DAP mínimo	DAP máximo	Média	Desvio Padrão	H mínimo	H máximo	Média	Desvio Padrão
16	1	3,5	4,5	4,0	0,288	7,9	9,2	8,5	0,424
	2	4,3	5,3	4,7	0,352	8,2	9,5	9,1	0,452
	3	5,2	5,9	5,6	0,234	8,0	10,5	9,5	0,644
	4	6,1	6,9	6,5	0,212	9,3	10,6	10,0	0,395
	5	6,5	7,1	6,8	0,177	9,9	11,4	10,4	0,426
	6	6,7	7,8	7,3	0,363	9,4	11,5	10,3	0,639
	7	7,2	8,3	7,7	0,287	9,3	10,6	9,9	0,525
	8	7,2	8,4	7,8	0,410	8,5	10,0	9,2	0,501
	9	7,3	8,1	7,7	0,270	7,5	9,3	8,6	0,518
	10	7,5	8,0	7,8	0,142	7,6	9,1	8,3	0,502
	11	6,8	8,3	7,6	0,368	7,0	9,0	8,0	0,579
	12	7,0	8,0	7,4	0,359	7,2	8,7	7,7	0,512
24	1	3,2	4,7	4,0	0,424	8,3	10,4	9,6	0,520
	2	4,3	6,0	5,1	0,517	10,0	11,8	10,6	0,567
	3	5,7	7,0	6,4	0,409	11,6	12,3	12,1	0,202
	4	7,1	8,1	7,6	0,301	12,2	14,2	13,1	0,510
	5	8,0	8,6	8,3	0,154	12,3	14,6	13,5	0,724
	6	8,7	9,9	9,1	0,394	13,5	15,0	13,9	0,511
	7	9,4	10,8	10,1	0,389	12,9	15,0	13,9	0,587
	8	10,0	11,5	10,6	0,420	12,5	14,9	13,4	0,667
	9	9,9	11,3	10,6	0,413	8,2	13,7	12,2	1,489
	10	10,4	11,8	11,0	0,500	11,4	13,2	12,3	0,538
	11	10,2	11,4	10,8	0,392	9,9	12,2	10,9	0,622
	12	9,6	11,0	10,4	0,434	9,6	10,4	10,1	0,237
36	1	3,2	4,7	4,2	0,421	8,3	10,9	10,2	0,767
	2	4,5	6,8	5,3	0,776	10,6	14,7	11,9	1,179
	3	5,9	9,0	7,7	0,998	12,4	16,0	14,5	1,074
	4	8,6	10,6	9,4	0,648	15,2	17,2	16,4	0,614
	5	10,2	11,1	10,7	0,256	16,3	17,5	16,8	0,347
	6	10,9	12,3	11,4	0,475	16,1	17,5	16,9	0,449
	7	11,8	13,1	12,5	0,386	15,2	17,7	16,9	0,703
	8	12,5	13,9	13,0	0,394	15,5	17,3	16,5	0,588
	9	12,7	14,0	13,4	0,405	15,1	17,0	16,0	0,676
	10	13,5	14,9	14,4	0,355	14,6	17,0	15,7	0,724
	11	13,5	16,0	14,4	0,757	13,7	15,6	14,6	0,640
	12	12,6	15,7	14,6	0,871	13,3	15,0	14,0	0,559

As estimativas dos parâmetros, as estatísticas coeficiente de correlação entre os valores de diâmetro observado e estimado ($r_{y\hat{y}}$) e erro-padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\%$) obtidos nos ajustes dos modelos de afilamento, para cada tratamento em cada idade, são apresentados na Tabela 3.

De forma geral, os ajustes do modelo de Kozak apresentaram valores de coeficiente de correlação ($r_{y\hat{y}}$) superiores aos demais modelos e menores valores de erro-padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) (Tabela 3), sendo o modelo selecionado para descrição da forma do fuste para os diferentes espaçamentos, nas idades avaliadas.

As estatísticas do ajuste do modelo de afilamento de Kozak (Tabela 3 e Figuras 5 e 6), com altos valores de coeficientes de correlação entre o diâmetro observado e estimado e baixos valores de erro padrão residual apresentam precisão e confiabilidade para estimativas do perfil dos fustes.

Segundo Campos e Leite (2013), o modelo mais usual na representação do perfil do fuste é o modelo linear polinomial de Kozak et al. (1969) devido sua facilidade de ajustamento e precisão nas estimativas.

Diante das vantagens do modelo de Kozak, este tem sido empregado em outros estudos (TEO et al., 2013; CAMPOS et al., 2014), para diferentes espécies a fim de descrever o perfil do fuste. Teo et al., 2013 testando os modelos de Kozak et al. (1969), Schöepfer (1966) e Hradetzky (1976) considerando os valores de R^2_{aj} , $S_{yx}\%$ e análise gráfica de resíduos, verificou-se que o modelo de Kozak também apresentou desempenho superior para estimativas de volume total com casca, de árvores de *Pinus elliottii* com 10 e 27 anos de idade.

Tabela 3. Estimativas dos parâmetros dos modelos para cada tratamento em cada idade e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade do ajuste.

Equações	Idade (meses)	Tratamento	β_0	β_1	β_2	β_3	$r_{y\hat{y}}$	$S_{yx}\%$
Demaerschalk (1972)	16	E1	0,223414	0,927717	0,602585	-0,764699	0,9671	5,23
		E2	0,184828	0,997857	0,575141	-0,745212	0,9740	4,90
		E4	0,310719	0,882801	0,678488	-0,861597	0,9765	4,47
		E5	0,330484	0,723182	0,770573	-0,828014	0,9808	4,14
		E6	0,495425	0,903526	0,943958	-1,294450	0,9665	6,01
		E7	0,120479 ^{n.s.}	0,862341	1,033870	-0,969304	0,9760	5,78
		E8	0,524696	0,713974	1,070199	-1,275832	0,9821	5,63
		E9	0,530577	0,633369	1,115255	-1,256587	0,9813	6,08
		E10	0,733615	0,416343 ^{n.s.}	1,096565	-1,237396	0,9687	7,55
		E11	0,604986	0,788367	1,211446	-1,562551	0,9819	7,51
		E12	0,779351	0,473725	1,361304	-1,593857	0,9735	9,99
		24	E1	0,042082 ^{n.s.}	0,717672	0,795385	-0,618383	0,9401
	E4		0,388498	1,105273	0,983439	-1,377226	0,9646	5,30
	E5		0,888127	0,448302 ^{n.s.}	1,044299	-1,336232	0,9597	5,68
	E6		0,204503 ^{n.s.}	0,943170	1,123321	-1,207599	0,9581	6,11
	E7		0,434002	0,803937	1,191254	-1,351121	0,9629	5,89
	E9		0,265092 ^{n.s.}	0,919816	1,187392	-1,294959	0,9371	9,15
	E10		0,841170	0,557905	1,244073	-1,531476	0,9517	7,46
	E11		0,713407	0,791350	1,208677	-1,620093	0,9613	7,20
	E12	1,257918	0,894371	1,248836	-2,311432	0,9054	9,83	
	36	E1	0,048271 ^{n.s.}	0,986133	0,774506	-0,779923	0,9417	7,48
		E2	-0,005657	0,987793	0,907894	-0,850782	0,9610	5,90
		E3	0,082422 ^{n.s.}	0,916042	0,994148	-0,965560	0,9604	5,61
		E4	0,592643	0,942386	1,142822	-1,548145	0,9533	5,98
		E5	0,216028 ^{n.s.}	0,854794	1,227939	-1,243262	0,9601	5,45
		E6	0,617354	0,997960	1,392046	-1,842791	0,9544	6,20
		E7	0,088634 ^{n.s.}	1,204229	1,353715	-1,563637	0,9543	6,27
		E8	0,372474 ^{n.s.}	0,780309	1,437952	-1,493403	0,9512	6,81
		E9	0,254231 ^{n.s.}	0,698513	1,333477	-1,210369	0,9431	6,98
		E10	0,533260 ^{n.s.}	0,785260	1,273099	-1,460880	0,9439	7,06
		E11	0,572737	0,521973	1,272906	-1,231580	0,9335	7,67
		E12	0,382803	0,849776	1,395003	-1,511809	0,9506	7,28

Continua ...

Continuação Tabela 2.

Equações	Idade (meses)	Tratamento	β_0	β_1	β_2	β_3	$r_{y\hat{y}}$	$S_{yx}\%$
Kozak et al. (1969)	16	E1	1,156474	-1,497224	0,359176	-	0,9668	7,31
		E2	1,235009	-2,045082	0,836695	-	0,9370	6,62
		E3	1,176640	-1,914069	0,760646	-	0,9437	6,09
		E4	1,107702	-1,353460	0,260373	-	0,9739	5,92
		E5	1,168211	-1,878731	0,725804	-	0,9627	5,59
		E6	1,240636	-2,281139	1,056096	-	0,9617	8,32
		E7	1,173044	-1,482938	0,325710	-	0,9790	7,77
		E8	1,212261	-2,129972	0,929134	-	0,9584	8,16
		E9	1,203999	-2,366193	1,170318	-	0,9593	8,46
		E10	1,168205	-1,676777	0,520095	-	0,9765	9,34
		E11	1,205793	-2,351318	1,156124	-	0,9625	9,76
		E12	1,218100	-2,664591	1,455113	-	0,9477	13,54
	24	E1	1,216263	-1,960975	0,755661	-	0,9811	9,30
		E2	1,261998	-2,566389	1,317303	-	0,9558	7,20
		E3	1,234002	-2,866875	1,639054	-	0,9588	6,79
		E4	1,301540	-2,459731	1,181558	-	0,9616	6,57
		E5	1,267149	-2,721157	1,467515	-	0,9569	7,10
		E6	1,305178	-3,282407	1,987068	-	0,9491	7,34
		E7	1,328202	-2,694786	1,387531	-	0,9754	7,36
		E8	1,268276	-2,835389	1,581275	-	0,9595	7,86
		E9	1,264570	-3,112485	1,858068	-	0,9505	11,70
		E10	1,381490	-2,874829	1,516423	-	0,9796	9,23
		E11	1,267495	-2,874259	1,621849	-	0,9599	9,73
		E12	1,290360	-3,300758	2,022024	-	0,9460	12,22
	36	E1	1,395062	-2,988444	1,612661	-	0,9786	9,18
		E2	1,326080	-2,904579	1,618201	-	0,9325	7,32
		E3	1,308841	-3,177831	1,881005	-	0,9388	6,52
		E4	1,460322	-3,089207	1,653650	-	0,9671	7,15
		E5	1,342137	-3,063365	1,742769	-	0,9458	6,14
		E6	1,296255	-3,040925	1,757273	-	0,9407	7,28
		E7	1,566799	-3,504838	1,984127	-	0,9744	7,28
		E8	1,363886	-3,044220	1,707538	-	0,9525	7,94
		E9	1,341944	-3,144137	1,817063	-	0,9242	8,02
		E10	1,647459	-3,892485	2,308324	-	0,9625	8,11
		E11	1,433366	-3,224517	1,832626	-	0,8965	9,19
		E12	1,370828	-3,395564	2,041650	-	0,9446	8,72

Continua ...

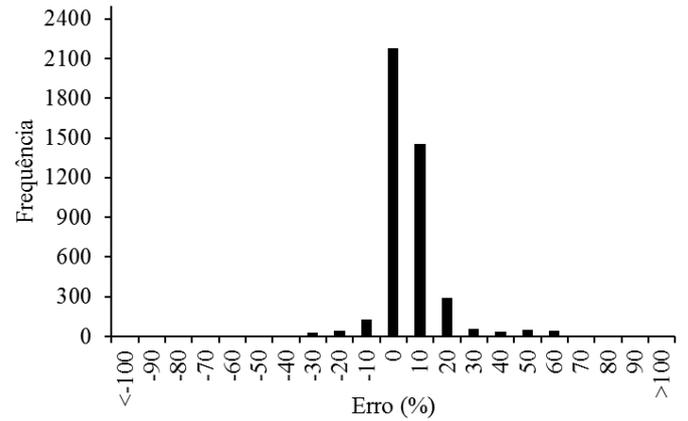
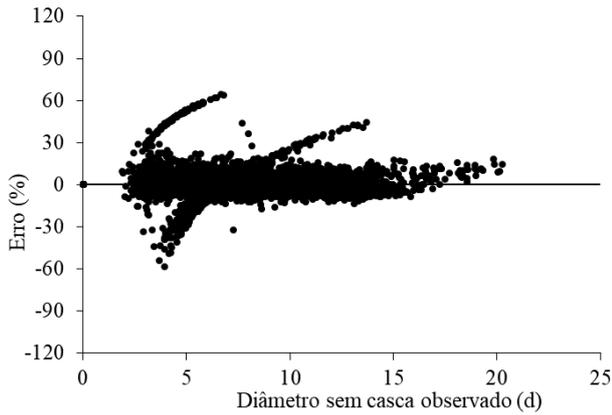
Continuação Tabela 2.

Equações	Idade (meses)	Tratamento	β_0	β_1	β_2	β_3	$r_{y\hat{y}}$	$S_{yx}\%$
Garay (1979)	16	E1	1,027732	-1431,332754	-0,000683	1,616417	0,9807	17,08
		E2	1,010154	-1368,483832	-0,000719	1,640425	0,9833	17,70
		E3	1,043196	-1402,653685	-0,000701	1,573038	0,9859	14,78
		E4	1,050054	-1366,117836	-0,000722	1,389474	0,9870	11,22
		E5	1,081407	-1132,924091	-0,000870	1,237313	0,9896	6,95
		E6	1,136634	-1547,090599	-0,000629	1,036814	0,9833	7,53
		E7	1,161639	-1228,060663	-0,000795	0,949504	0,9893	10,04
		E8	1,189447	-1114,218030	-0,000878	0,918973	0,9902	12,55
		E9	1,200034	-661,913785	-0,001492	0,889721	0,9899	15,17
		E10	1,224684	-881,094681	-0,001114	0,900195	0,9859	15,95
		E11	1,293014	-919,237874	-0,001059	0,804565	0,9881	24,11
		E12	1,348909	-669,612804	-0,001457	0,726348	0,9858	33,00
	24	E1	1,083354	-1666,267877	-0,000583	1,232174	0,9726	9,31
		E2	1,058913	-1428,101502	-0,000687	1,237183	0,9819	8,58
		E3	1,090982	-1370,493214	-0,000719	1,113098	0,9837	6,15
		E4	1,102352	-1338,993695	-0,000735	0,992310	0,9868	6,76
		E5	1,216870	0,300813	0,964000	0,289501	0,9950	31,50
		E6	1,224131	0,314165	0,958520	0,285903	0,9959	32,95
		E7	1,156041	-1428,459052	-0,000685	0,841291	0,9886	13,06
		E8	1,159172	-1357,977207	-0,000719	0,823401	0,9879	14,38
		E9	1,192725	-1650,891136	-0,000576	0,810075	0,9740	17,12
		E10	1,201107	-1538,279027	-0,000631	0,796321	0,9844	17,79
		E11	1,204279	-1292,323993	-0,000750	0,818259	0,9843	17,59
		E12	1,237504	-1643,255817	-0,000576	0,773844	0,9316	24,84
	36	E1	1,059390	-1801,203408	-0,000541	1,237638	0,9729	9,86
		E2	1,109623	-1404,123522	-0,000698	1,058420	0,9838	6,38
		E3	1,179981	0,300339	0,964207	0,310955	0,9934	27,99
		E4	1,196166	0,296643	0,965635	0,279342	0,9909	29,89
		E5	1,183529	0,427887	0,903381	0,388211	0,9928	26,57
		E6	1,254119	0,341072	0,946680	0,272306	0,9960	34,79
		E7	1,233247	0,324916	0,953901	0,266062	0,9966	33,87
		E8	1,246418	0,367170	0,934279	0,285220	0,9947	35,72
		E9	1,258369	0,317837	0,956956	0,256621	0,9940	35,67
		E10	1,259202	0,282028	0,971136	0,226920	0,9949	36,19
		E11	1,284894	0,294026	0,966655	0,229798	0,9896	39,01
		E12	1,295749	0,369674	0,933099	0,274988	0,9956	41,03

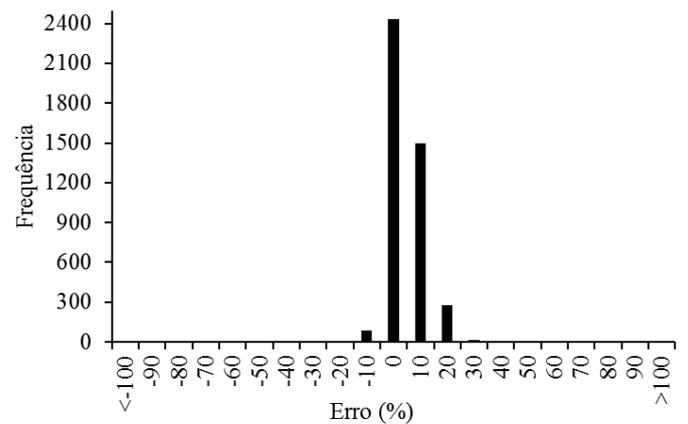
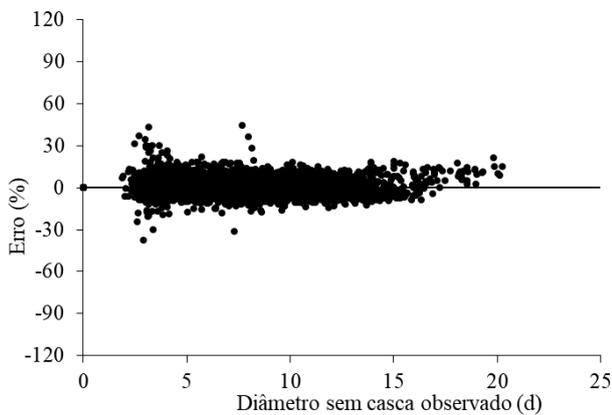
Obs.: Espaçamentos não apresentados na tabela deve-se ao fato de que os parâmetros não se convergiram.

n.s. = parâmetro não significativo a 5% de significância.

Demaerschalk



Kozak



Garay

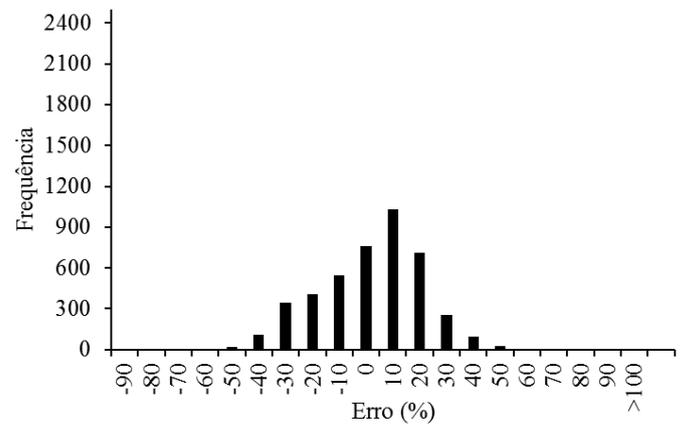
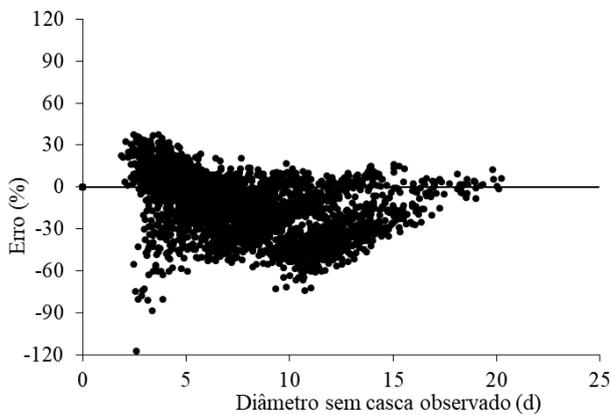


Figura 4. Distribuição dos resíduos e frequência percentual dos erros em função do diâmetro sem casca observado (d) para os modelos ajustados, considerando-se todos os espaçamentos em todas as idades.

Avaliando a distribuição dos resíduos, obtidos nos ajustes de todos os espaçamentos em todas as idades, podem ser observados a distribuição e o comportamento dos resíduos, onde os pontos do modelo de Kozak distribuem-se mais uniformemente em relação aos outros modelos (Figura 4), indicando boa precisão entre os valores observados e estimados (GUJARATI; PORTER, 2011).

No gráfico de frequência percentual dos erros para todos os espaçamentos (Figura 4), o modelo de Kozak apresenta uma dispersão dos resíduos mais uniforme e agrupada, e apresentando uma maior concentração dos erros entre $\pm 10\%$, sendo assim o modelo selecionado para descrição dos perfis dos fustes. Os modelos de Demaerschalk e Garay apresentaram tendências de superestimação e ou subestimação para os dados agrupados, todos os tratamentos e todas idades, observado a partir do gráfico de dispersão dos resíduos (Figura 4).

O modelo de Kozak segue uma tendência mais uniforme da distribuição dos resíduos nos espaçamentos E1, E2 E3 e E4 para todas as idades (Figura 5), e apresentando ligeira tendências de superestimação e ou subestimação a partir do espaçamento E5 (Figura 5 e 6).

Os gráficos de resíduos apresentados com os dados de todos os tratamentos em todas as idades (Figura 4) demonstram que houve uma maior dispersão dos resíduos localizados na região mais próxima à base dos fustes, que de acordo com Souza et al. (2008) isso ocorre pois na porção basal da árvore apresenta uma maior variação no diâmetro.

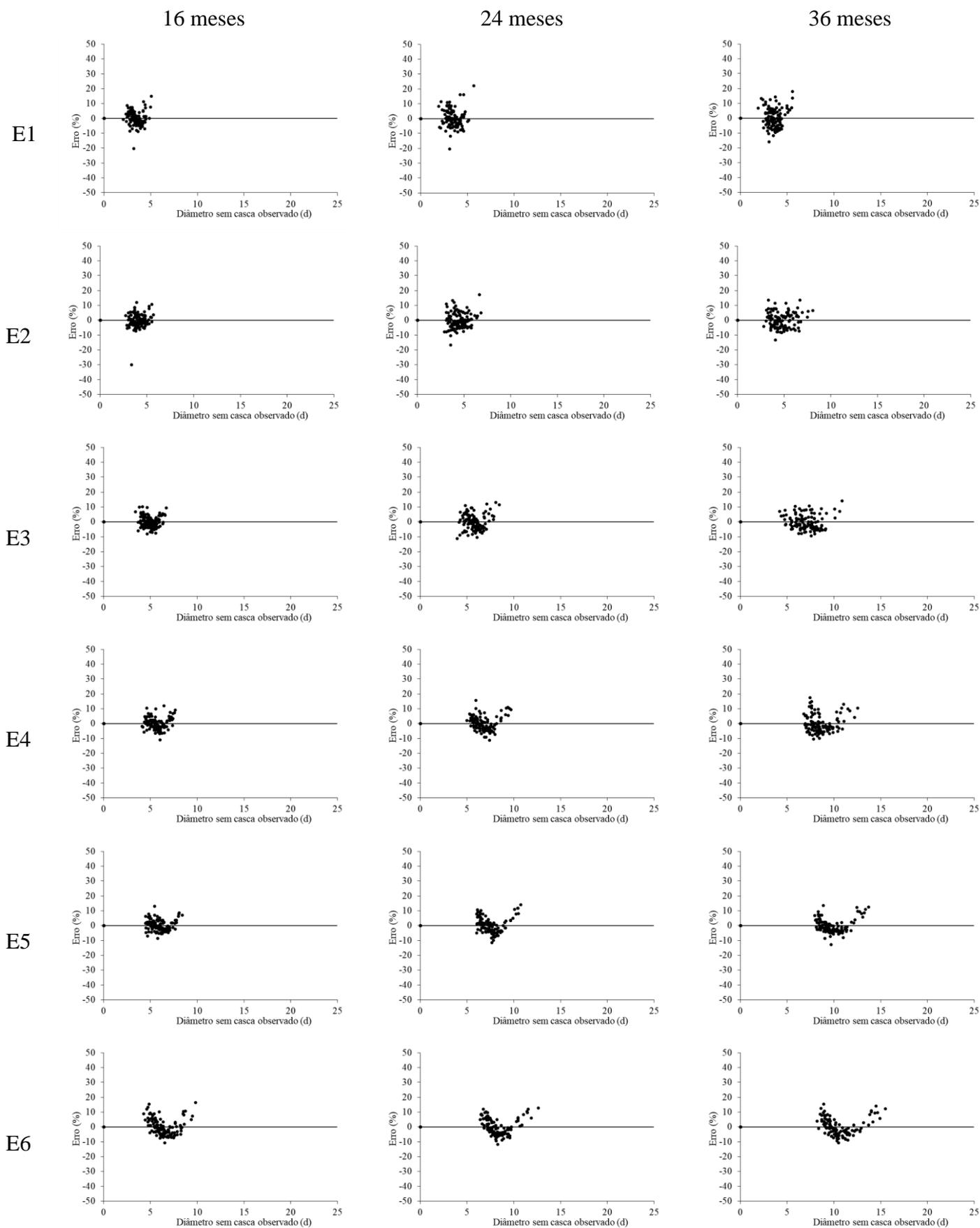


Figura 5. Análise gráfica dos resíduos para a variável diâmetro (d) sem casca referente ao ajuste do modelo de Kozak para os tratamentos 1 ao 6, em cada idade.

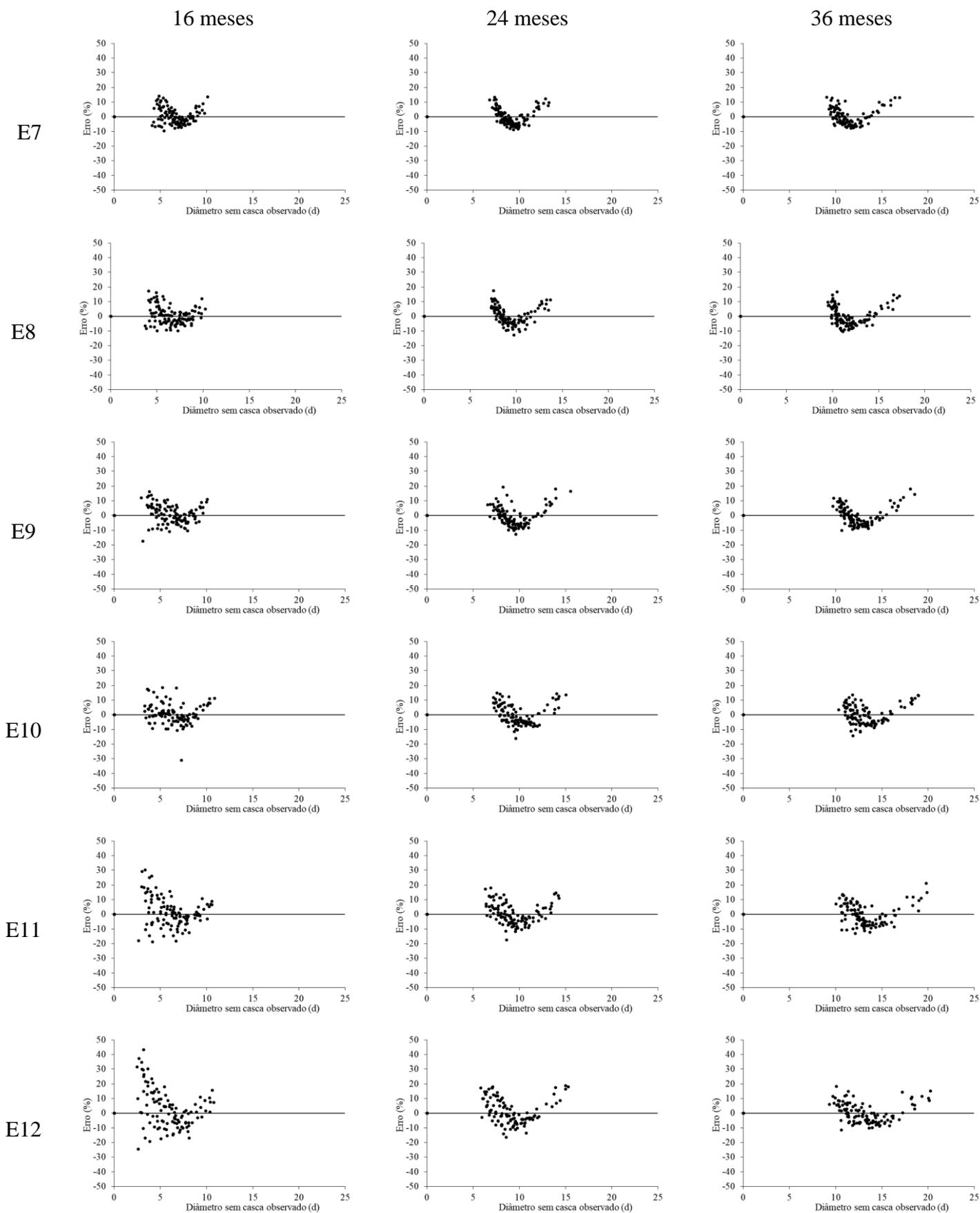


Figura 6. Análise gráfica dos resíduos para a variável diâmetro (d) sem casca referente ao ajuste do modelo de Kozak para os tratamentos 7 ao 12, em cada idade.

Testes de identidade de modelos foram aplicados nos modelos selecionados com a finalidade de verificar a igualdade entre a forma dos fustes devido ao espaçamento inicial de plantio. Alguns grupos apresentam significância demonstrando a necessidade do uso de equações diferentes.

Com a aplicação dos testes de identidade de modelos verificou-se que a forma (ou afilamento) dos fustes das árvores é coincidente para dois ou mais tratamentos na mesma idade, podendo assim, utilizar uma mesma equação para mais de um grupo (Tabela 4).

Nogueira et al (2008) avaliando a influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus Taeda* L. no estado de Santa Catarina, no qual aplicou teste de identidade de modelos nas equações para os diferentes espaçamentos verificou que uma mesma equação pode ser aplicada a espaçamentos semelhantes, fato este também observado neste estudo.

Observa-se pelos resultados do teste de identidade de modelo (Tabela 4) que os tratamentos que apresentam valores de área útil por árvore próximos indicam igualdade entre as equações, portanto, a forma ou o afilamento dos fustes nestes tratamentos não diferiram entre si estatisticamente pelo teste F ao nível de 5% de significância, podendo ser usada uma única equação para os tratamentos em comum. A Figura 6 em ilustração do afilamento da árvore média estimada pela equação do modelo de Kozak, observa-se que os espaçamentos com valores de área útil por árvore próximos apresentam afilamento semelhante, conforme o resultado obtido pelo testes de identidade de modelos.

Vendruscolo et al. (2016) avaliando o efeito do espaçamento de plantio na forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* em quatro diferentes arranjos de plantio, aplicaram testes de identidade de modelos para verificar se há igualdade entre a forma dos fustes e observaram que o perfil do fuste das árvores de espaçamentos (3×2 m e 4×2 m) com áreas úteis próximas pode ser expresso por mesma equação de afilamento, assim como encontrado nesse estudo.

Na idade de 36 meses um maior número de grupos apresentaram igualdade nas equações, podendo ser utilizada uma mesma equação para mais de dois espaçamentos, em uma mesma idade.

Kohler et al., (2016) avaliando a evolução do afilamento dos fustes de árvores em povoamentos de *Pinus taeda*, aplicaram teste de identidade de modelos a fim de verificar a mudança na forma do tronco das árvores e concluíram que a estratificação dos dados em classes de idades nos ajustes de funções de afilamento pode produzir estimativas mais acuradas do sortimento.

Tabela 4. Resultados pela estatística F e seus respectivos p-valor referentes ao teste de identidade na equação do modelo de Kozak.

Idade	Trat.	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
16	E1	1.43 ^{n.s.} p=0.232	1.33 ^{n.s.} p=0.264	12.7* p=0.000	17.6* p=0.000	31.85* p=0.000	47.44* p=0.000	51.96* p=0.000	46.1* p=0.000	42.05* p=0.000	52.88* p=0.000	66.19* p=0.000
	E2	-	0.17 ^{n.s.} p=0.918	7.95* p=0.000	14.11* p=0.000	30.32* p=0.000	45.19* p=0.000	50.22* p=0.000	46.69* p=0.000	43.66* p=0.000	58.38* p=0.000	73* p=0.000
	E3	-	-	6.43* p=0.000	10.52* p=0.000	23.68* p=0.000	35.91* p=0.000	40.04* p=0.000	37.35* p=0.000	35.33* p=0.000	49.29* p=0.000	63.92* p=0.000
	E4	-	-	-	2.09 ^{n.s.} p=0.099	11.36* p=0.000	15.77* p=0.000	19.89* p=0.000	24.03* p=0.000	25.55* p=0.000	42.94* p=0.000	58.58* p=0.000
	E5	-	-	-	-	4.11* p=0.000	7.4* p=0.000	10.03* p=0.000	12.84* p=0.000	14.52* p=0.000	29.42* p=0.000	44.12* p=0.000
	E6	-	-	-	-	-	1.23 ^{n.s.} p=0.296	1.48 ^{n.s.} p=0.219	2.68* p=0.000	4.39* p=0.000	14.92* p=0.000	26.6* p=0.000
	E7	-	-	-	-	-	-	0.44 ^{n.s.} p=0.726	4.61* p=0.000	7.56* p=0.000	20.48* p=0.000	32.33* p=0.000
	E8	-	-	-	-	-	-	-	2.65* p=0.000	5.11* p=0.000	15.68* p=0.000	26* p=0.000
	E9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43 ^{n.s.} p=0.729	5.56* p=0.000	13.47* p=0.000
	E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.01* p=0.000	9.82* p=0.000
	E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.41 ^{n.s.} p=0.066
24	E1	2.47 ^{n.s.} p=0.063	1.9 ^{n.s.} p=0.130	9.2* p=0.000	6.5* p=0.000	11.07* p=0.000	16.14* p=0.000	18.94* p=0.000	8.04* p=0.000	12.94* p=0.000	11.86* p=0.000	12.81* p=0.000
	E2	-	1.15 ^{n.s.} p=0.328	6.41* p=0.000	7.21* p=0.000	11.76* p=0.000	17.09* p=0.000	20.01* p=0.000	10.83* p=0.000	16.98* p=0.000	18.1* p=0.000	21.43* p=0.000
	E3	-	-	3.71* p=0.000	2.8* p=0.000	6.1* p=0.000	10.17* p=0.000	12.37* p=0.000	5.51* p=0.000	9.38* p=0.000	9.86* p=0.000	14.7* p=0.000
	E4	-	-	-	1.77 ^{n.s.} p=0.154	1.95 ^{n.s.} p=0.122	3.16* p=0.000	3.97* p=0.000	4.68* p=0.000	6.73* p=0.000	9.51* p=0.000	17.53* p=0.000
	E5	-	-	-	-	0.71 ^{n.s.} p=0.546	2.41 ^{n.s.} p=0.067	3.41* p=0.000	1.24 ^{n.s.} p=0.295	2.4 ^{n.s.} p=0.068	3.53* p=0.000	10.2* p=0.000
	E6	-	-	-	-	-	0.49 ^{n.s.} p=0.690	0.97 ^{n.s.} p=0.409	1.54 ^{n.s.} p=0.204	1.9 ^{n.s.} p=0.129	4.1* p=0.000	11.63* p=0.000
	E7	-	-	-	-	-	-	0.08 ^{n.s.} p=0.971	2.74* p=0.000	2.65* p=0.000	5.88* p=0.000	13.88* p=0.000
	E8	-	-	-	-	-	-	-	3.42* p=0.000	3.15* p=0.000	6.77* p=0.000	14.75* p=0.000
	E9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.32 ^{n.s.} p=0.809	0.41 ^{n.s.} p=0.747	4.28* p=0.000
	E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.65 ^{n.s.} p=0.583	4.96* p=0.000
	E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.59 ^{n.s.} p=0.053

Continuação Tabela 3.

Idade	Trat.	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
36	E1	2.01 ^{n.s.} p=0.113	5.16*	11*	17.72*	21.21*	21.27*	24.73*	15.99*	13.32*	11.78*	21.1*
	E2	-	4.63* p=0.000	10.46* p=0.000	16.96* p=0.000	16.7* p=0.000	18.89* p=0.000	20.96* p=0.000	11.12* p=0.000	8.77* p=0.000	6.38* p=0.000	13.3* p=0.000
	E3	-	-	1.87 ^{n.s.} p=0.135	4.88* p=0.000	7.87* p=0.000	7.23* p=0.000	9.39* p=0.000	5.47* p=0.000	4* p=0.000	5.56* p=0.000	10.27* p=0.000
	E4	-	-	-	0.49 ^{n.s.} p=0.693	3.03* p=0.000	1.67 ^{n.s.} p=0.174	3.01* p=0.000	2.77* p=0.000	2.3 ^{n.s.} p=0.077	5.36* p=0.000	7.95* p=0.000
	E5	-	-	-	-	2.09 ^{n.s.} p=0.102	0.53 ^{n.s.} p=0.662	1.52 ^{n.s.} p=0.209	2.58 ^{n.s.} p=0.054	2.6 ^{n.s.} p=0.053	6.26* p=0.000	8.38* p=0.000
	E6	-	-	-	-	-	0.76 ^{n.s.} p=0.515	0.37 ^{n.s.} p=0.778	0.38 ^{n.s.} p=0.765	0.9 ^{n.s.} p=0.442	2.91* p=0.000	3.03* p=0.000
	E7	-	-	-	-	-	-	0.26 ^{n.s.} p=0.855	1.65 ^{n.s.} p=0.178	2.12 ^{n.s.} p=0.099	5.36* p=0.000	6.31* p=0.000
	E8	-	-	-	-	-	-	-	1.38 ^{n.s.} p=0.251	2.14 ^{n.s.} p=0.095	4.92* p=0.000	5.14* p=0.000
	E9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14 ^{n.s.} p=0.934	1.23 ^{n.s.} p=0.298	1.44 ^{n.s.} p=0.231
	E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.99 ^{n.s.} p=0.396	1.65 ^{n.s.} p=0.178
	E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.39 ^{n.s.} p=0.762

* = significativo a 1% de significância; ^{n.s.} = não significativo a 1% de significância.

A Figura 7 ilustra os perfis dos fustes das árvores médias em todos os tratamentos em cada idade, estimada pelo modelo de Kozak. Observa-se que os espaçamentos mais adensados (E1, E2 e E3) proporcionam fuste mais cilíndricos e os espaçamentos menos adensados (E10, E11 e E12) em fustes mais cônicos, e com o aumento da idade os espaçamentos de forma geral tendem a ser mais cônicos.

Segundo Hohenadl citado por Schneider (2008), em árvores médias ou dominadas sujeitas à competição intensa, há uma tendência de ocorrer um maior depósito de incremento nas posições superiores do fuste, de tal maneira que estas árvores adquirem uma forma mais cilíndrica.

Segundo Lima (1986) e Campos e Leite (2013), a maioria dos modelos de *taper* não descreve todo o fuste com a mesma precisão, principalmente na porção do topo das árvores, onde os fustes tendem a apresentar as maiores diferenças quando submetidos a espaçamentos muito reduzidos.

Árvores plantadas em espaçamentos mais amplos apresentam maior número de ramos e folhas, resultando maior proporção de copa, e maior ganho de biomassa no caule na porção basal, proporciona uma forma mais cônica a árvore (HENSKENS et al., 2001).

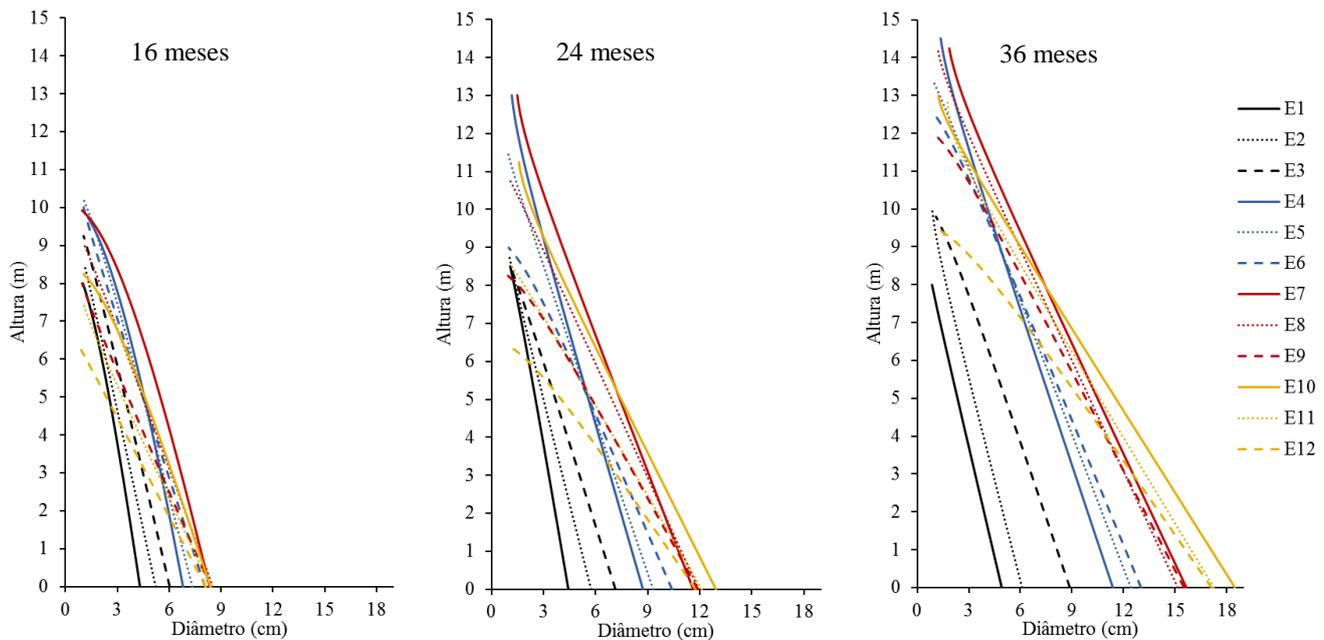


Figura 7. Estimativas dos perfis dos fustes das árvores médias referentes ao ajuste do modelo de Kozak em diferentes espaçamentos, para cada idade avaliada.

Conforme Campos e Leite (2013) é esperado que, árvores conduzidas em menores arranjos espaciais iniciais apresentem fustes mais cilíndricos, em comparação com árvores sob arranjos mais amplos. Esta característica também foi observada em Pinkard e Nielsen (2003), que avaliaram a influência de seis arranjos espaciais nas características da copa e do povoamento de *Eucalyptus nitens* para uma aplicação de desbaste na região norte da Tasmânia e em Nogueira et al. (2008), que avaliaram a influência do arranjo espacial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda*.

Rance et al. (2012) avaliando plantios de *Eucalyptus grandis* submetidos a diferentes arranjos espaciais e conduzidos em distintos sítios, na região sudoeste da Austrália, observaram que as árvores em idades juvenis apresentam fustes mais cilíndricos nos menores arranjos de plantio quando se comparados às árvores dos arranjos mais amplos.

Henskens et al. (2001) avaliando quatro diferentes arranjos de plantio de *Eucalyptus globulus* de 3 a 4 anos, observaram que o número de folhas e ramos das árvores aumentam quando submetidas a espaçamentos mais amplos, e o número de ramos grandes diminui com o aumento da densidade de plantio, resultando em estruturas de copas diferentes. Corroborando isso, Rance et al. (2012) observaram que árvores menos ramificadas apresentavam fustes menos cônicos que os fustes das árvores mais ramificadas.

Espaçamentos mais amplos resultam em maiores valores de diâmetro (Figura 6). Bernardo et al., (1998) avaliando três arranjos espaciais (3x1,5, 3x3 e 4x3 m) nas idades de 15, 31 e 41 meses de povoamentos *Eucalyptus camaldulensis*, *E. urophylla* e *E. pellita* afirmaram que árvores individuais

responderam a um espaçamento mais amplo e a uma competição menor com maior crescimento do diâmetro individual.

Os valores de fator de forma de todos tratamentos em todas as idades apresentados na Tabela 5 coincide com o desenho dos perfis dos fustes apresentados na Figura 7.

Em todas as idades, o fator de forma apresenta uma tendência de decréscimo do fator de forma dos espaçamentos mais adensados para os menos adensados (Figura 8).

Espaçamentos mais adensados comparados aos menos adensados apresentam valores de fator de forma maiores, implicando em obtenção de árvores mais cilíndricas (NOGUEIRA et al., 2008; RANCE et al., 2012).

Tabela 5. Fator de forma médio para cada espaçamento, em cada idade.

	Idade 16 meses	Idade 24 meses	Idade 36 meses
E1	0,53 a A	0,49 a B	0,47 a B
E2	0,52 b A	0,47 b B	0,45 b C
E3	0,54 a A	0,45 b B	0,41 c C
E4	0,50 b A	0,41 c B	0,37 d C
E5	0,49 c A	0,41 c B	0,35 e C
E6	0,46 c A	0,39 d B	0,33 f C
E7	0,44 d A	0,37 e B	0,33 f C
E8	0,44 d A	0,37 e B	0,32 f C
E9	0,43 d A	0,41 c A	0,35 e B
E10	0,46 c A	0,39 d B	0,36 e C
E11	0,48 c A	0,41 c B	0,37 d C
E12	0,47 c A	0,43 c B	0,36 e C

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha não diferem a 95% de probabilidade, pelo teste de Scott-Knott.

Com o aumento da idade, todos os tratamentos apresentaram um decréscimo no fator de forma com significância pelo Teste de Scott-Knott ($p > 0.05$). Isso pode ser explicado, porque conforme observado por Larson (1969) que há a ocorrência de maior conicidade em indivíduos adultos submetidos a espaçamentos adensados pode ser atribuída a manutenção de uma maior tamanho de copa, gerando um aumento do crescimento do diâmetro da base da mesma. Em florestas jovens, a taxa de crescimento aumenta à medida que as copas se desenvolvem, isto então declina substancialmente logo após o dossel completo (BINKLEY et al., 2002).

Os tratamentos diferiram estatisticamente entre si, exceto os tratamentos E1 e E9, sendo semelhantes em duas idades.

Entre as idades avaliadas, os tratamentos apresentaram tendências semelhantes quanto ao fator de forma calculado para a árvore completa. Na Figura 8 observa-se o decréscimo dos valores em relação as idades, seguindo o mesmo comportamento em todas as idades.

Os espaçamentos mais adensados apresentam valores de fator de forma maiores, o que pode ser explicado porque quando as árvores estão sujeitas à maior competição, a tendência é investir no incremento em diâmetro das posições superiores do fuste, e isto proporciona uma forma mais cilíndrica para o fuste (ANDRADE et al., 2007).

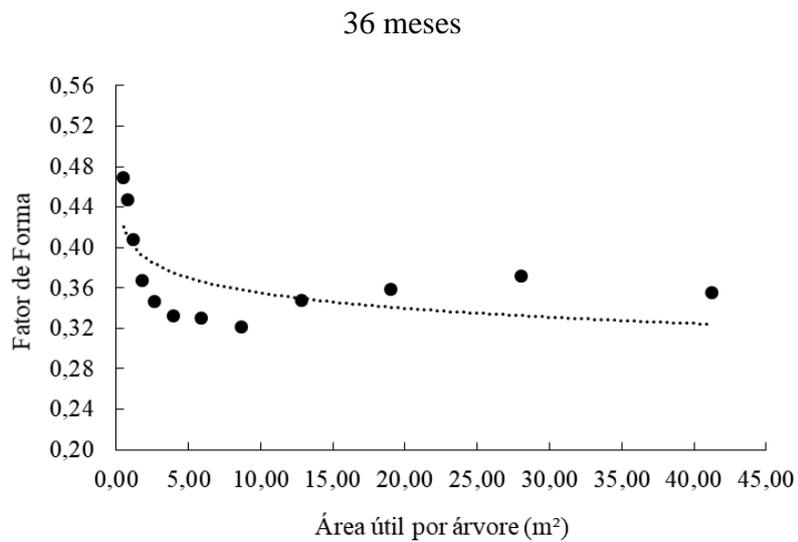
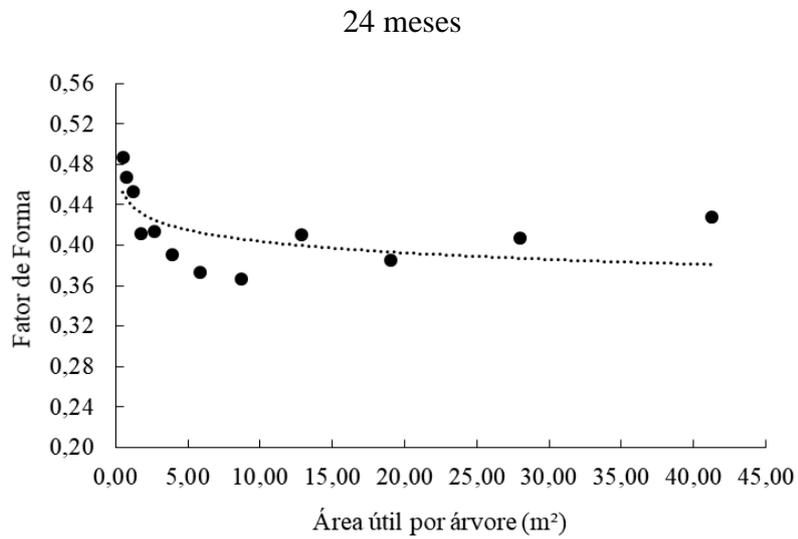
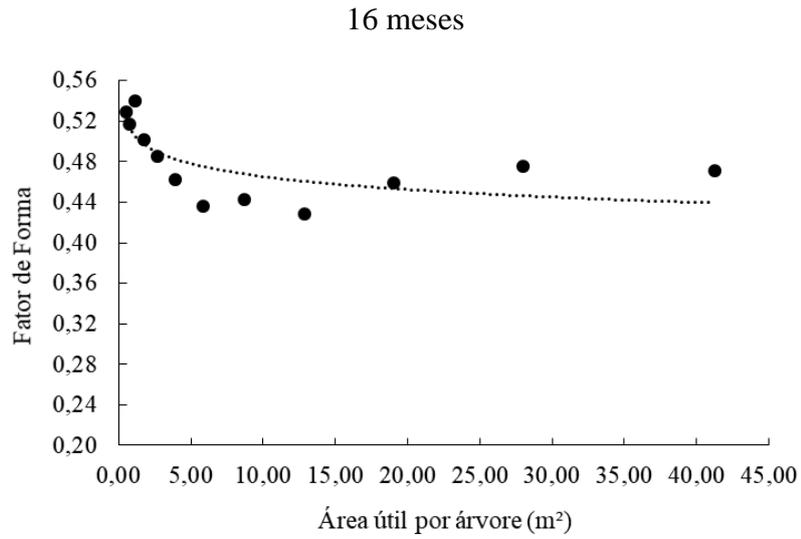


Figura 8. Tendência dos valores de fator de forma médio da árvore completa apresentada pelos espaçamentos em cada idade.

4. CONCLUSÃO

O modelo de Kozak foi o de melhor acurácia para descrever o afilamento dos fustes das árvores de eucalipto nos arranjos espaciais avaliados, nas idades de 16, 24 e 36 meses.

Árvores em povoamentos mais adensados apresentam maior fator de forma resultando em fustes mais cilíndricos, e em povoamentos menos adensados fatores de forma menores apresentando fustes mais cônicos.

Com aumento da idade dos povoamentos os fustes das árvores tendem a apresentar maior conicidade em todos os espaçamentos testados.

O teste de identidade de modelos demonstra a semelhança entre espaçamentos com áreas vitais por árvores próximos podem ser utilizada uma mesma equação para descrição do perfil do fuste.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. M.; FINGER, C. A. F.; THOMAS, C.; SCHNEIDER, P. R. Variação do incremento anual ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e densidades populacionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 239-246, 2007.

AQUINO, P. S. R. Crescimento inicial de eucalipto em função do espaçamento utilizando delineamento sistemático tipo “leque”. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017. 136p.

BALDWIN JR., V. C.; PETERSON, K. D.; CLARK III, A.; FERGUSON, R. B.; STRUB, M. R.; BOWER, D. R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old Loblolly Pine. **Forest Ecology and Management**, v. 137, n. 1/3, p. 91-102, 2000.

BERNARDO, A. L.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; HARRISON, R. B.; FIRME, D. J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in south-eastern Brazil. **Forest Ecology and Management**. vol.104, p. 1–13, 1998.

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

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4ªed.: Editora UFV. Viçosa-MG, 2013. 605p.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de árvores em multiprodutos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 513-520, 2014.

DEMAERSCHALK, J. P. Integrated systems for the estimation of tree taper and Volume. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v.3, n.90, p.90-94, 1972.

FERREIRA, G. W. D.; FERRAZ FILHO, A. C.; PINTO, A. L. R.; SCOLFORO, J. R. S. Influência do desbaste na forma do fuste de povoamentos naturais de *Eremanthus incanus* (Less.) Less. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v.35, n.4, p.1707-1720, 2014.

GARAY, L. Tropical forest utilization system. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. **Seattle: Coll. Forest Res.**, Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p.

GONÇALVES, F. G., OLIVEIRA, J. T. D. S., SILVA, G. F. D., NAPPO, M. E., TOMAZELO FILHO, M. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.5, p.947-959, 2010.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. Econometria básica. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924p.

HENSKENS, F. L.; BATTAGLIA, M.; CHERRY, M. L.; BEADLE, C. L. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*, **Trees**, v. 15, p. 365-377, 2001.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statsisher abranger keiten.** (Biometrische Beitrage zu aktuellem forschung projekten). Baden: Wurttemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146p.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. DO A. Evolution of tree stem taper in *Pinus taeda* stands. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.7, p.1185-1191, 2016.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. **Forest Chronicle**, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

LARSON, P. R. **Wood formation and the concept of wood quality.** Yale Univ. Sch. For. Bull n. 74, 1969. 45 p

MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; OLIVEIRA, J. T. S.; NOGUEIRA, G. S.; ASSIS, A. L. Avaliação de funções de afilamento visando à otimização de fustes de *Eucalyptus* sp para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v.13, p. 71-82, 2007.

MORAES, M. A.; DE MORAES, S. M. B., DA SILVA, E. C. B., KUBOTA, T. Y. K., SILVA, A. M., DE RESENDE, M. D. V., MORAES, M. L. T. Variação genética em progênies de *Jacaranda cuspidifolia* Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo “leque”. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 175-183, 2013.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.

NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, n.18, p.283-307, 1962.

ODA-SOUZA, M.; BARBIN, D.; RIBEIRO JR, P. J.; STAPE, J. L.. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 499-509, 2008.

ORMEROD, D. W. A simple bole model. **Forest Chronicle**, Toronto, v.49, n.3, p.136-138, 1973.

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**. v. 172, p. 215-227, 2003.

PRODAN, M. **Holzmesslehre**. Frankfurt am Main: Sauerlander'sVerlag, 1965. 644p.

RANCE, S. J.; MENDHAM, D. S.; CAMERON, D. M.; GROVE, T. S. An evaluation of the conical approximation as a generic model for estimating stem volume, biomass and nutrient content in young *Eucalyptus* plantations. **New Forests**. v. 43, p. 109-128, 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2016. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: The R Foundation for Statistical Computing.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e a igualdade de parâmetros no caso de dados de delineamento experimentais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 46, n. 266, p. 383-409, 1999.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad**. [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966.

SCOLFORO, J. R. S. **Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira.** Lavras: UFLA/ FAEPE, 1997. 292p.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512, 1974.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal.** Viçosa: Editora UFV, 2007, 276p.

SOUZA, R. R.; NOGUEIRA, G. S.; MURTA JÚNIOR, L. S.; PELLI, E.; OLIVEIRA, M. L. R.; ABRAHÃO, C. P.; LEITE, H. G. Forma de fuste de árvores de *Eucalyptus* em plantios com diferentes densidades iniciais. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 33-40, 2016.

SOUZA, C. A. M.; CHASSOT, T.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2506-2511, 2008.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D. Insights from full-rotation Nelder spacing trials with Eucalyptus in São Paulo, Brazil. **Southern Forests**. v. 72, p. 91-98, 2010.

STAPE, J. L. Utilização de delineamento sistemático tipo leque no estudo de espaçamentos florestais. 1995. 104p. **Dissertação** (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

TEO, S. J.; MARCON, A.; EHLERS, T.; BIANCHI, J. C.; PELOSO, A. NAVA, P. R.; COSTA, R. H. Modelos de afilamento para *Pinus elliottii* em diferentes idades, na região de Caçador, SC. **Floresta**, Curitiba, v.43, n.3, p.439-452, 2013.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R.; CARVALHO, S. P. C.; SOUZA, H. S.; SILVA, R. S.; CHAVES, A. G. S. Forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos. **Adv. For. Sci.**, Cuiabá, v.3, n.3, p.51-54, 2016.

CAPÍTULO II

OTIMIZAÇÃO DE MULTIPRODUTOS DE POVOAMENTO DE EUCALIPTO DE CURTA ROTAÇÃO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

Resumo – Diante da demanda por diferentes produtos madeiráveis torna-se necessário o estudo de sortimento do fuste em diferentes espaçamentos de plantio. O objetivo deste trabalho é a otimização da madeira de eucalipto para curta rotação, visando a conversão dos fustes em multiprodutos, submetidos a diferentes espaçamentos de plantio. Foram utilizados dados de um experimento sistemático em leque, composto por três leques completos e com 12 tratamentos (espaçamentos) cada. Os 12 tratamentos analisados apresentam as seguintes áreas úteis por árvore em cada espaçamento: E1 (0,50 m²); E2 (0,77 m²); E3 (1,17 m²); E4 (1,76 m²); E5 (2,64 m²); E6 (3,94 m²); E7 (5,86 m²); E8 (8,69 m²); E9 (12,86 m²); E10 (19,00 m²); E11 (28,01 m²); E12 (41,25 m²). Os tratamentos foram avaliados em três diferentes idades (16, 24 e 36 meses). Utilizou-se o modelo de afilamento de Kozak para estimativa dos diâmetros e altura e posteriormente, uma simulação de corte das árvores para multiprodutos da madeira. Pelo modelo de Schumacher e Hall modificado foram realizadas estimativas de volume por árvore individual com casca e para povoamento total por hectare para cada espaçamento, para as idades avaliadas. Diferentes peças foram encontradas nos espaçamentos, nas diferentes idades. Uma maior produção para povoamento total por hectare foi obtida em espaçamentos mais adensados. Um melhor retorno financeiro pode ser obtido quando conduzido o povoamento para produção de multiprodutos em comparação a uso único de lenha. A otimização dos fustes em multiprodutos permitiu uma valoração de até 89% a mais em relação a valoração apenas para lenha.

Palavras-chave: Funções de afilamento, sortimento, volume, *Eucalyptus*

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes dificuldades do manejo florestal e, em especial da avaliação econômica de povoamentos florestais, reside na inexistência de tabelas de sortimento apropriadas que possibilitem determinações rápidas do estoque de madeira para diferentes tipos de aproveitamento (SCHNEIDER et al., 1996).

As funções de afilamento são uma excelente opção para quantificação dos sortimentos dos povoamentos florestais. Os modelos de afilamento permitem estimar três características básicas das árvores: diâmetro em qualquer comprimento ou altura do fuste; comprimento ou altura total ou a que se encontra em um diâmetro limite especificado no fuste; e o volume entre pontos quaisquer do fuste (CAMPOS; LEITE, 2013). Assim, atua como fator importante nas decisões de manejo e planejamentos florestais e, portanto, na maximização do aproveitamento da madeira produzida.

A produtividade de um povoamento florestal está ligada as amplitudes de diâmetro das encontradas, o qual este é significativamente influenciado pela área vital disponível para a árvore (FORRESTER et al., 2013). Conseqüentemente, os valores de área basal do povoamento apresenta diferentes valores em resposta ao arranjo de plantio, alterando a produtividade do povoamento. A área seccional é diretamente influenciada pelo número de árvores por hectare, sendo que menores espaçamentos resultam em maiores médias de área basal (somatório das áreas seccionais) quando comparado com espaçamentos maiores (OLIVEIRA et al., 2009).

Diante da demanda crescente por produtos madeiráveis a expectativa é que a utilização de tecnologias mais avançadas de produção permita aproveitar, no futuro, 100% da floresta, possibilitando novos e assim, as árvores serão também provedoras de matéria-prima para diferentes segmentos produtivos (SNIF, 2017). Contudo, leva-se a tendência de que os povoamentos sejam manejados segundo o conceito de florestas para multiprodutos, assim obtendo madeira para diferentes produtos e que possa possibilitar um maior retorno financeiro (SOARES et al., 2003).

A rentabilidade financeira da condução de povoamentos para a produção de madeira para multiprodutos é maior que quando destinada a produção de produtos para uso único (SOARES et al., 2003; CASTRO et al., 2011).

É indispensável fazer uma análise econômica sobre as condições de mercado antes de fazer a escolha do espaçamento e/ou arranjo de plantio, para determinar qual será o mercado consumidor alvo (produto) da produção florestal, e a partir desta informação traçar o objetivo da produção e o manejo a ser aplicado no povoamento. Assim, pode-se dizer que o produto final desejado é o fator que determina o espaçamento de plantio a ser adotado (OLIVEIRA NETO et al., 2003).

O objetivo deste trabalho é a otimização da madeira de eucalipto para curta rotação, visando a conversão dos fustes em multiprodutos, submetidos a diferentes espaçamentos de plantio em diferentes idades.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em experimento de um híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone EAC 1528) instalado em delineamento sistemático tipo “leque”, localizado em Brasília, Distrito Federal.

O experimento é composto por três leques conforme proposto por Nelder (1962), cada um estruturado por 14 espaçamentos (tratamentos) com 36 repetições (arcos), sendo o primeiro e o último arco desconsiderados, pois são respectivamente, uma bordadura interna e uma bordadura externa. Os 12 tratamentos analisados apresentam as seguintes áreas úteis por planta em cada espaçamento: E1 (0,50 m²); E2 (0,77 m²); E3 (1,17 m²); E4 (1,76 m²); E5 (2,64 m²); E6 (3,94 m²); E7 (5,86 m²); E8 (8,69 m²); E9 (12,86 m²); E10 (19,00 m²); E11 (28,01 m²); E12 (41,25 m²).

No ajuste do modelo de afilamento foram utilizados dados provenientes da cubagem realizada em cinco árvores por espaçamento em cada leque, nas idades de 16, 24 e 36 meses. As árvores foram cubadas em pé, sendo coletados os dados de diâmetro em seções de 0,5 m da base do fuste (nível do solo) até a altura de 5 metros. O volume real com casca de cada seção foi calculado pelo método de cubagem proposto por Smalian, e o volume do ponteiro como se fosse um cone, conforme as equações (1), (2) e (3) (FINGER, 1992).

$$V_i = \frac{\bar{g}_1 + \bar{g}_2}{2} \cdot L \quad (1)$$

$$V_c = \frac{1}{3} g_n \cdot l_n \quad (2)$$

$$V = (\sum_{i=1}^n V_i) + V_c \quad (3)$$

Em que: V_i = volume com casca da seção, em m³; \bar{g}_1 e \bar{g}_2 = áreas seccionais com casca, obtidas nas extremidades da seção, em m²; L = comprimento da seção, em m; V_c = Volume do ponteiro (cone); g_n = área seccional da base do cone; l_n = comprimento do cone; V = Volume total com casca.

Os dados de espessura da casca foram coletados simultaneamente à cubagem. Assim, foram mensuradas a espessura da casca nas seções de 0,5 m da base do fuste (nível do solo) até a altura de 5 metros em todas as árvores-amostra selecionadas para a cubagem.

A estimativa de volume por árvore individual com casca e para povoamento total por hectare foi calculada para cada espaçamento, para as idades avaliadas, pelo modelo de Schumacher e Hall modificado acrescentando a variável idade (I) no modelo, como apresentado na equação:

$$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * H^{\beta_2} * I^{\beta_3} * \varepsilon \quad (4)$$

Em que: β_i = parâmetros a serem estimados; DAP = diâmetro (cm) a 1,30 m do solo; H = altura total da árvore (m); I = idade avaliada (meses); ε = erro de estimativa.

Foi utilizado o modelo de *taper* proposto por Kozak et al., (1969), ajustado para todos os espaçamentos em cada idade avaliada, cujas relações funcionais e expressões para estimar o diâmetro (d) em qualquer altura e a altura (h) para qualquer diâmetro, são apresentadas a seguir:

$$\left(\frac{d_i}{DAP}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{H}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{H}\right)^2 + \varepsilon \quad (5)$$

$$\hat{d} = DAP \sqrt{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \left(\frac{h}{H}\right) + \hat{\beta}_2 \left(\frac{h}{H}\right)^2} \quad (6)$$

$$\hat{h} = \frac{-\hat{\beta}_1 H \pm \sqrt{(\hat{\beta}_1 H)^2 - 4\hat{\beta}_2 \left(\hat{\beta}_0 H^2 - \frac{d^2 H^2}{DAP^2}\right)}}{2\hat{\beta}_2} \quad (7)$$

Em que: β_i = parâmetros a serem estimados; $\hat{\beta}_i$ = parâmetros estimados; d_i = diâmetro (cm) mensurado em diferentes alturas h ao longo do fuste; \hat{d} = diâmetro (cm) estimado a uma determinada altura i ; DAP = diâmetro (cm) a 1,30 m do solo; h = altura i (m) de um referido diâmetro; \hat{h} = altura i (m) estimada de um referido diâmetro; H = altura total da árvore (m); ε = erro de estimativa.

O ajuste do modelo de afilamento foi realizado utilizando os dados sem casca em resposta a escolha dos produtos para conversão dos fustes para uso múltiplo. A partir do modelo volumétrico ajustado foram realizadas estimativas de volume por árvore individual com casca e para povoamento total por hectare, em cada espaçamento.

A precisão dos ajustes dos modelos de afilamento e volumétrico foram avaliados a partir do coeficiente de correlação entre os valores de diâmetros observados e estimados (modelo de afilamento); coeficiente de correlação entre os valores de volume observados e estimados ($r_{y\hat{y}}$) e erro-padrão da estimativa relativo (S_{yx} %).

As especificações das dimensões dos diâmetros mínimo (*d_{min}*) e máximo (*d_{max}*) sem casca, comprimento mínimo para a conversão dos fustes em multiprodutos estão apresentadas na Tabela 5, obtidas por análise de mercado na região do estudo.

O estabelecimento das peças descritas na Tabela 6 é restrita aos valores das amplitudes de diâmetro e altura observado e que podem ser encontrados em povoamentos de curta rotação, não sendo possível a inclusão de produtos de serraria devido as dimensões mínimas exigidas no mercado para as peças.

Os dados de cada árvore foram processados no software SigmaE utilizando programação recursiva (LEITE et al., 1995). O software permite simular o melhor uso de cada parte da árvore.

A estimativa da quantidade de peças por hectare foi realizada a partir do número de árvores por hectare, retirada a mortalidade em cada espaçamento, para cada idade.

Gráficos de estimativa da quantidade de peças por hectare foram construídos a fim de apresentar o efeito do espaçamento ao longo do tempo na quantidade e classificação dos produtos que podem ser obtidos na conversão dos fustes para uso múltiplo. Os gráficos apresentam escalas diferentes devido a redução do número de peças com aumento dos espaçamentos.

Tabela 6. Especificações dos produtos e suas dimensões, definidos para o sortimento de multiprodutos.

Código	Classificação dos produtos	Diâmetro Mín. (cm)	Diâmetro Máx. (cm)	Comprimento Mín (m)	Preços (R\$)	
					Peça*	m ³
1	Varas	2	5	2,25	0,45	-
2	Estaca Tipo I	4	6	2,20	3,15	-
3	Estaca Tipo II	6	8	2,20	4,20	-
4	Estaca Tipo III	8	10	2,20	5,80	-
5	Estaca Tipo IV	10	12	2,20	9,00	-
6	Estaca Tipo V	8	10	2,50	6,60	-
7	Estaca Tipo VI	10	12	2,50	9,90	-
8	Estaca Tipo VII	12	14	2,50	11,40	-
9	Estaca Tipo VIII	14	16	2,50	15,50	-
10	Mourão	15	18	2,70	16,40	-
11	Lenha	1	18	0,50	-	45,00

*Preços descontando os custos de transformação da madeira.

*Preços obtidos por análise de mercado na região do estudo.

Foram calculados os volumes de todas as peças escolhidas para otimização a partir de suas dimensões (Tabela 6). Foi realizado o somatório de todos os volumes de todas as peças estimadas por hectare juntamente com o volume obtido para o produto lenha, sendo o resultado do cálculo nomeado “Volume total estimado do multiprodutos”, para posteriormente comparar a produção obtida pela otimização de multiprodutos e a produção de biomassa do povoamento total.

Para demonstrar a rentabilidade financeira que pode ser obtida em povoamento para uso múltiplo em comparação quando destinado a único uso, foi realizada uma comparação entre duas alternativas de produção, conversão dos fustes em multiprodutos ou destinação total do povoamento para lenha (energia), avaliando qual proporciona maior retorno financeiro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição das variáveis Diâmetro a altura de 1,30 do solo (DAP) e Altura total (H), com valores máximo e mínimos, médias e desvio padrão podem ser observadas na Tabela 2 descrita no Capítulo I deste estudo.

Os resultados das estimativas dos parâmetros dos ajustes do modelo de Schumacher e Hall modificado e do modelo de Kozak, para cada tratamento em cada idade, e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade dos ajustes são apresentados na Tabela 7 e Tabela 8.

As estatísticas dos ajustes do modelo volumétrico de Schumacher e Hall modificado (Tabela 7) e do modelo de afilamento de Kozak (Tabela 8), com altos valores de coeficientes de correlação entre o diâmetro observado e estimado e baixos valores de erro padrão residual apresentam precisão e confiabilidade para estimativas do perfil dos fustes.

Teo et al., 2013 ajustando diferentes modelos de afilamento para descrever o perfil do fuste árvores de *Pinus elliottii*, observou estatísticas de precisão com valores superiores para o modelo de Kozak para estimativas de volume total com casca.

O modelo de Kozak possui a vantagem de modelar todo o fuste com uma única função, diferentes dos modelos segmentados (CAMPOS; LEITE, 2013). Segundo Prodan et al. (1997) o modelo de Kozak pode-se integrar facilmente, permitindo transformá-los em equações de volume, e ainda reordenados para cálculo de alturas comerciais.

Tabela 7. Estimativas dos parâmetros do modelo de Schumacher e Hall modificado para cada tratamento em cada idade e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade do ajuste.

Tratamentos	β_0	β_1	β_2	β_3	$r_{y\hat{y}}$	$S_{yx}\%$
E1	0,000105	2,094289	0,547162	-0,003259 ^{ns}	0,9785	5,15
E2	0,000071	2,300646	0,579838	-0,019352	0,9945	4,31
E3	0,000130	1,713518	0,801995	-0,055369 ^{ns}	0,9902	6,39
E4	0,000196	1,644253	-0,038062 ^{ns}	0,536579	0,9952	4,53
E5	0,000162	1,190469	0,498266	0,483615	0,9985	2,73
E6	0,000118	1,586994	0,626035	0,219354 ^{ns}	0,9965	4,25
E7	0,000085	1,800075	0,712028	0,101573	0,9986	2,87
E8	0,000102	1,285802	0,769417	0,375615	0,9977	3,79
E9	0,000079	1,661423	0,637371	0,288153	0,9980	3,94
E10	0,000074	1,583106	0,511992	0,468766	0,9979	4,21
E11	0,000062	0,911994	0,768127	0,824031	0,9974	4,99
E12	0,000073	1,846979	0,594756	0,200711 ^{ns}	0,9974	5,27

Tabela 8. Estimativas dos parâmetros do modelo de Kozak para cada tratamento em cada idade e as respectivas estatísticas para avaliação da qualidade do ajuste.

Idade (meses)	Tratamento	β_0	β_1	β_2	$r_{y\hat{y}}$	$S_{yx}\%$
16	E1	1,156474	-1,497224	0,359176	0,9668	7,31
	E2	1,235009	-2,045082	0,836695	0,9370	6,62
	E3	1,176640	-1,914069	0,760646	0,9437	6,09
	E4	1,107702	-1,353460	0,260373	0,9739	5,92
	E5	1,168211	-1,878731	0,725804	0,9627	5,59
	E6	1,240636	-2,281139	1,056096	0,9617	8,32
	E7	1,173044	-1,482938	0,325710	0,9790	7,77
	E8	1,212261	-2,129972	0,929134	0,9584	8,16
	E9	1,203999	-2,366193	1,170318	0,9593	8,46
	E10	1,168205	-1,676777	0,520095	0,9765	9,34
	E11	1,205793	-2,351318	1,156124	0,9625	9,76
	E12	1,218100	-2,664591	1,455113	0,9477	13,54
24	E1	1,216263	-1,960975	0,755661	0,9811	9,30
	E2	1,261998	-2,566389	1,317303	0,9558	7,20
	E3	1,234002	-2,866875	1,639054	0,9588	6,79
	E4	1,301540	-2,459731	1,181558	0,9616	6,57
	E5	1,267149	-2,721157	1,467515	0,9569	7,10
	E6	1,305178	-3,282407	1,987068	0,9491	7,34
	E7	1,328202	-2,694786	1,387531	0,9754	7,36
	E8	1,268276	-2,835389	1,581275	0,9595	7,86
	E9	1,264570	-3,112485	1,858068	0,9505	11,70
	E10	1,381490	-2,874829	1,516423	0,9796	9,23
	E11	1,267495	-2,874259	1,621849	0,9599	9,73
	E12	1,290360	-3,300758	2,022024	0,9460	12,22
36	E1	1,395062	-2,988444	1,612661	0,9786	9,18
	E2	1,326080	-2,904579	1,618201	0,9325	7,32
	E3	1,308841	-3,177831	1,881005	0,9388	6,52
	E4	1,460322	-3,089207	1,653650	0,9671	7,15
	E5	1,342137	-3,063365	1,742769	0,9458	6,14
	E6	1,296255	-3,040925	1,757273	0,9407	7,28
	E7	1,566799	-3,504838	1,984127	0,9744	7,28
	E8	1,363886	-3,044220	1,707538	0,9525	7,94
	E9	1,341944	-3,144137	1,817063	0,9242	8,02
	E10	1,647459	-3,892485	2,308324	0,9625	8,11
	E11	1,433366	-3,224517	1,832626	0,8965	9,19
	E12	1,370828	-3,395564	2,041650	0,9446	8,72

Os resultados da otimização com estimativa da quantidade das peças por hectare para todos os espaçamentos em cada idade e estimativa do produto lenha, considerando a conversão do fuste em multiprodutos, são apresentados nos gráficos nas Figura 9, 10, 11 e na Figura 12.

Diante dos resultados da otimização dos fustes em multiprodutos (Figura 9, 10 e 11), observa-se que peças de dimensões maiores podem ser encontradas apenas na idade de 36 meses, o que pode ser explicado devido aos espaçamentos, principalmente os menos adensados, nessa idade apresentarem maiores valores de diâmetro e altura.

Dentro do mesmo espaçamento, a classificação dos produtos e a quantidade de peças apresentam alterações ao longo dos meses (Figura 9, 10 e 11).

A classificação dos produtos não é a mesma encontrada dentro de um espaçamento ao longo dos meses, devido ao incremento de diâmetro e altura no fuste das árvores. Diante do ganho de biomassa no fuste ao longo dos meses, os produtos de maiores dimensões podem ser encontrados na idade de 36 meses, observa-se um maior número destes produtos nos espaçamentos maiores, sendo E10 (19,00 m²), E11 (28,01 m²), e E12 (41,25 m²), sendo também os espaçamentos que apresentam a maior diversidade de produtos, retornando todas classificações dos produtos da otimização (Figura 11).

Na mesma idade, a quantidade de peças diminuem nos espaçamentos menos adensados em resposta ao decréscimo do número de árvores que são encontradas por hectare (Figura 11). O número de peças dentro de uma mesma classificação de produto, principalmente produtos de menores dimensões, tendem a diminuir ao longo dos meses.

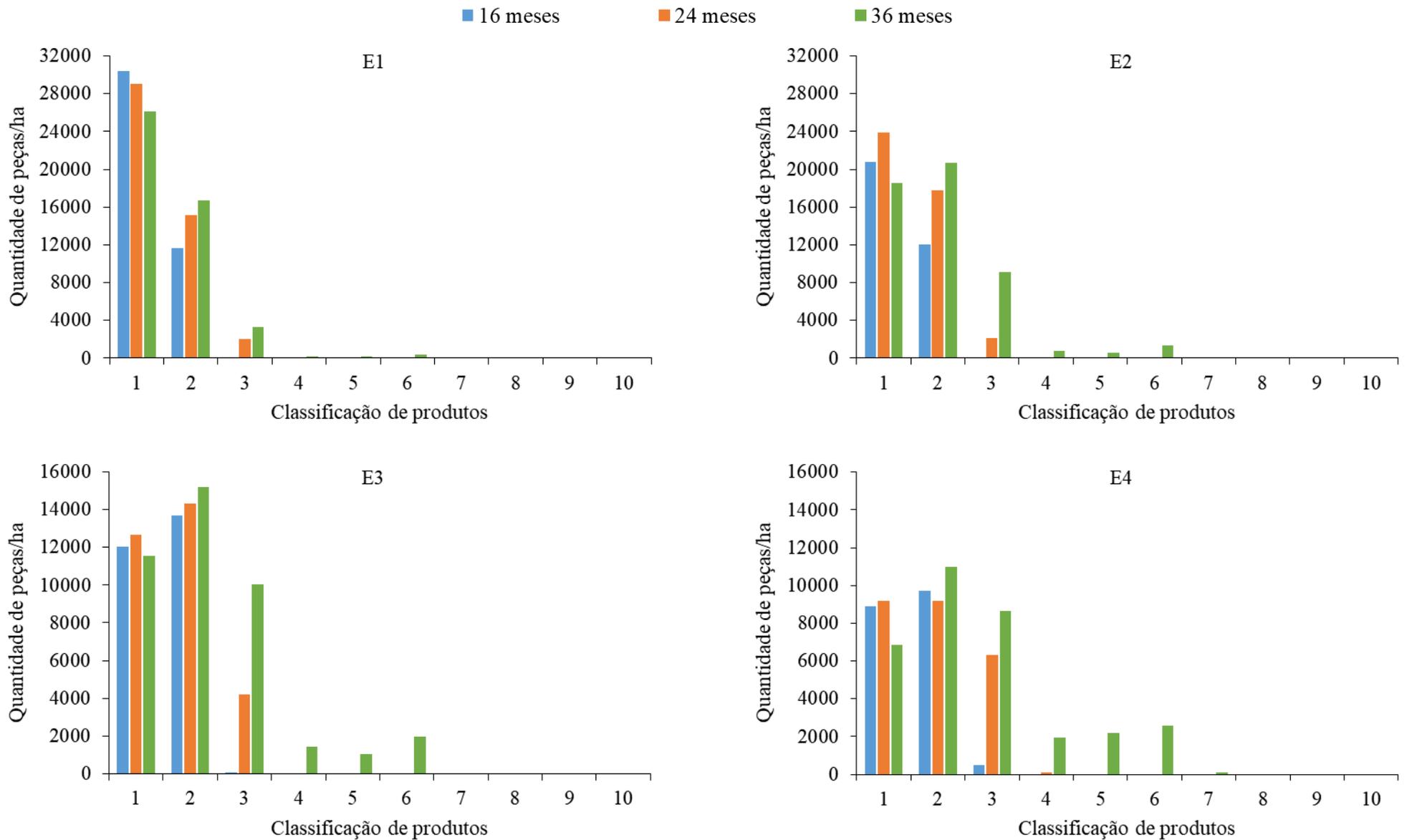


Figura 9. Quantidade de peças estimadas por hectare obtidas na otimização do fuste em multiprodutos para os espaçamentos 1 ao 4, em todas as idades.

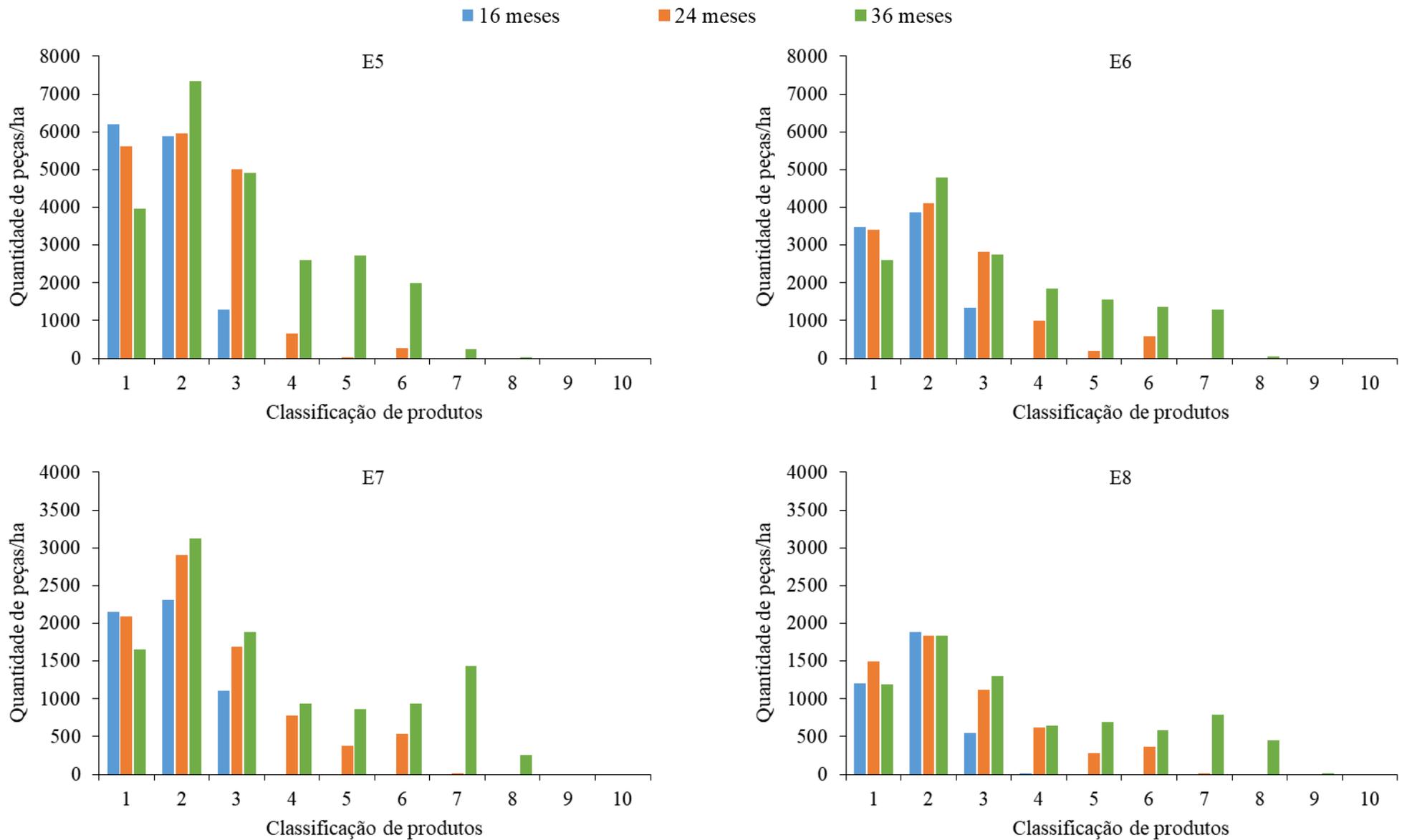


Figura 10. Quantidade de peças estimadas por hectare obtidas na otimização do fuste em multiprodutos para os espaçamentos 5 a 8, em todas as idades.

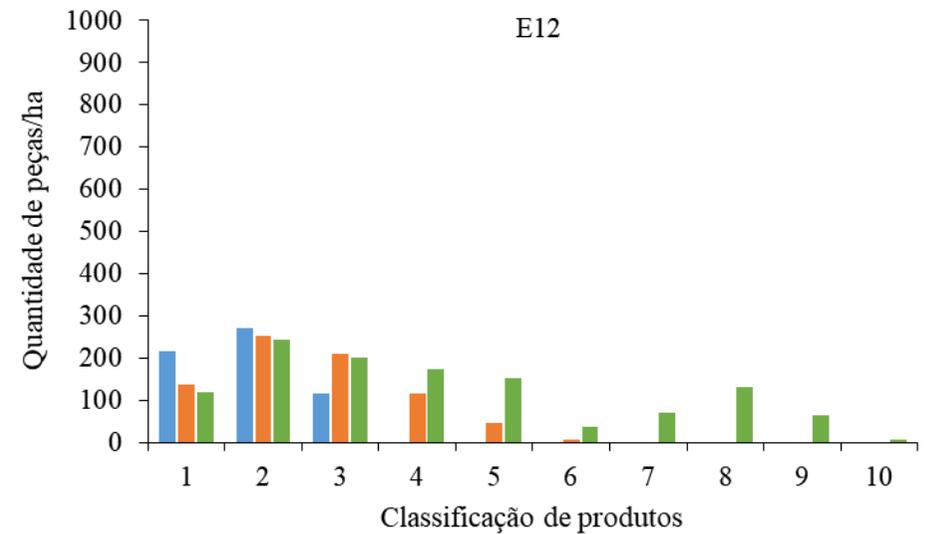
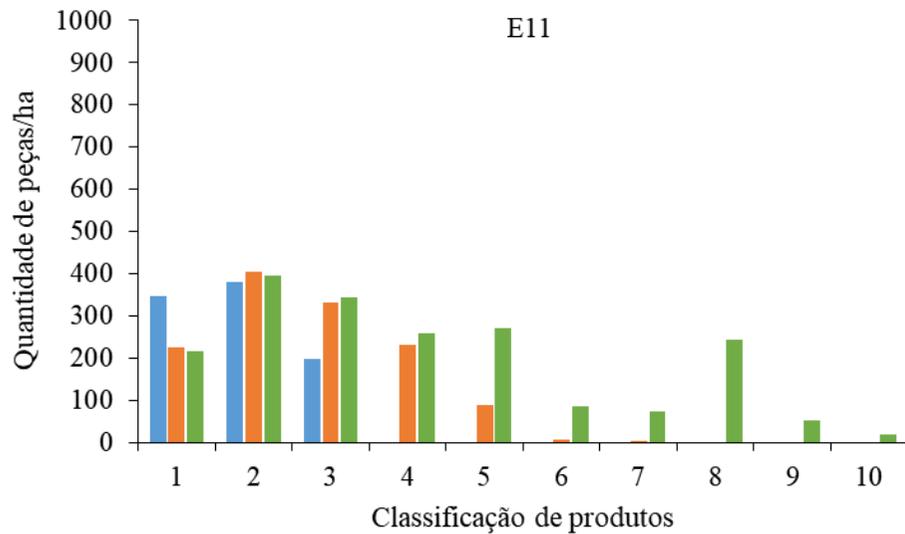
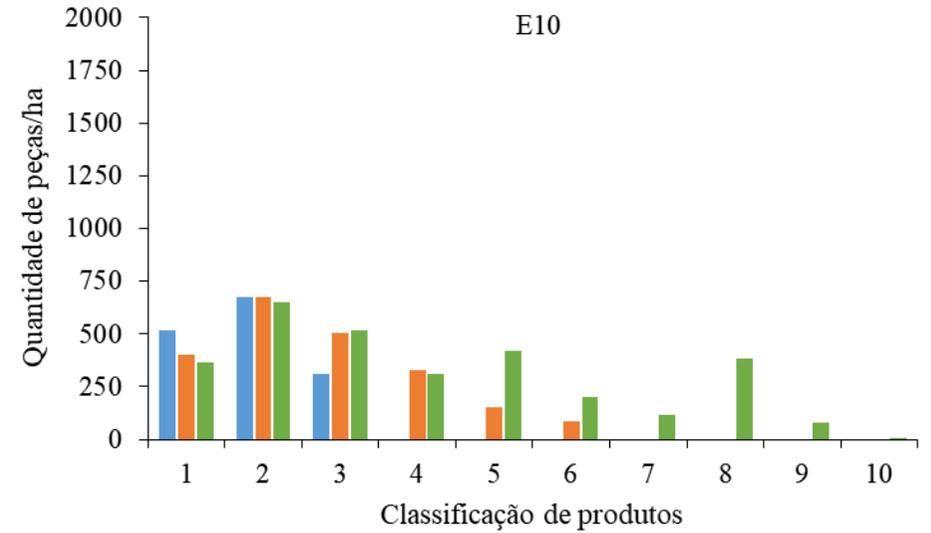
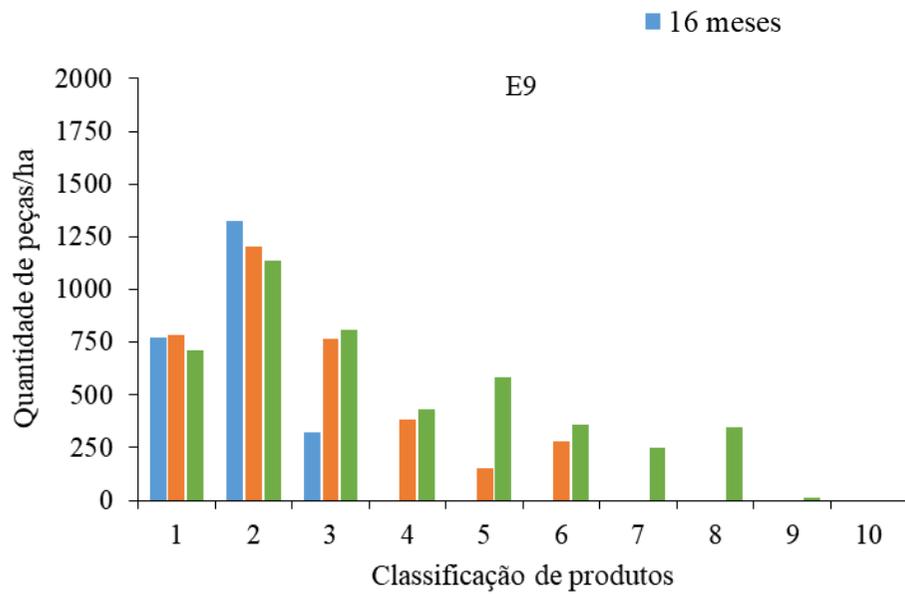


Figura 11. Quantidade de peças estimadas por hectare obtidas na otimização do fuste em multiprodutos para os espaçamentos 9 ao 12, em todas as idades.

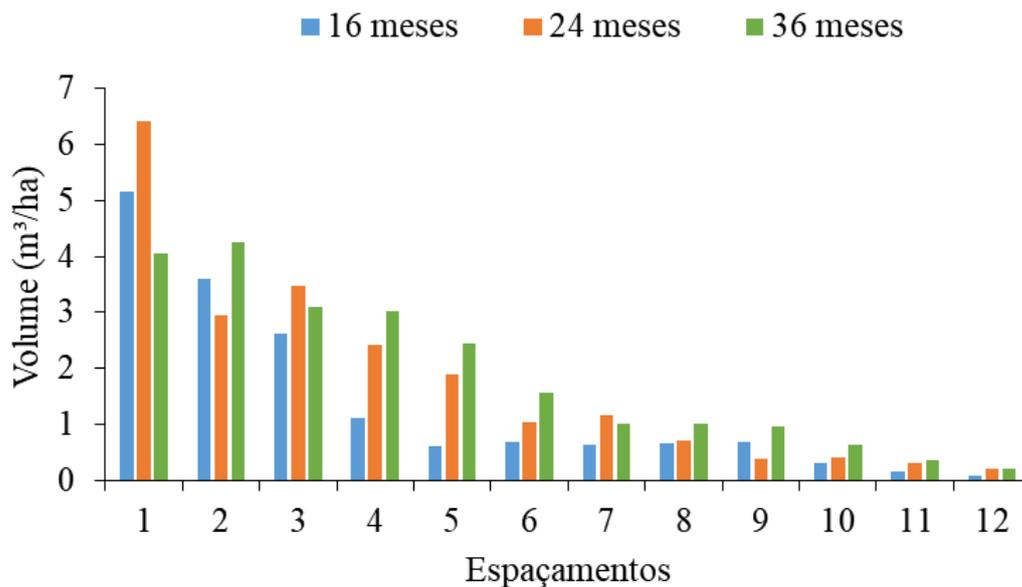


Figura 12. Volume total de lenha (m³) por hectare para cada espaçamento, nas três idades (16, 24 e 36 meses) obtido na otimização dos fustes em multiprodutos.

O volume total estimado dos multiprodutos, exceto a classificação de lenha, corresponde acima de 95% do volume total de todos produtos, para todos os espaçamentos em todas as idades.

A porcentagem de volume de lenha obtida do volume total dos multiprodutos obtidos na otimização dos fustes decresceram ao longo das idades de 16, 24 e 36 meses, apresentando valores percentuais de 3,3%, 2,3% e 1,3%, respectivamente.

O volume total estimado dos multiprodutos por hectare, em cada espaçamento, apresentou valores menores que o volume total estimado para a produção de biomassa do povoamento (Figura 12). Essa diferença é explicada por não ser possível conversão completa de todo o fuste em multiprodutos, produzindo alta quantidade de resíduos, os quais não são destinados a lenha (energia).

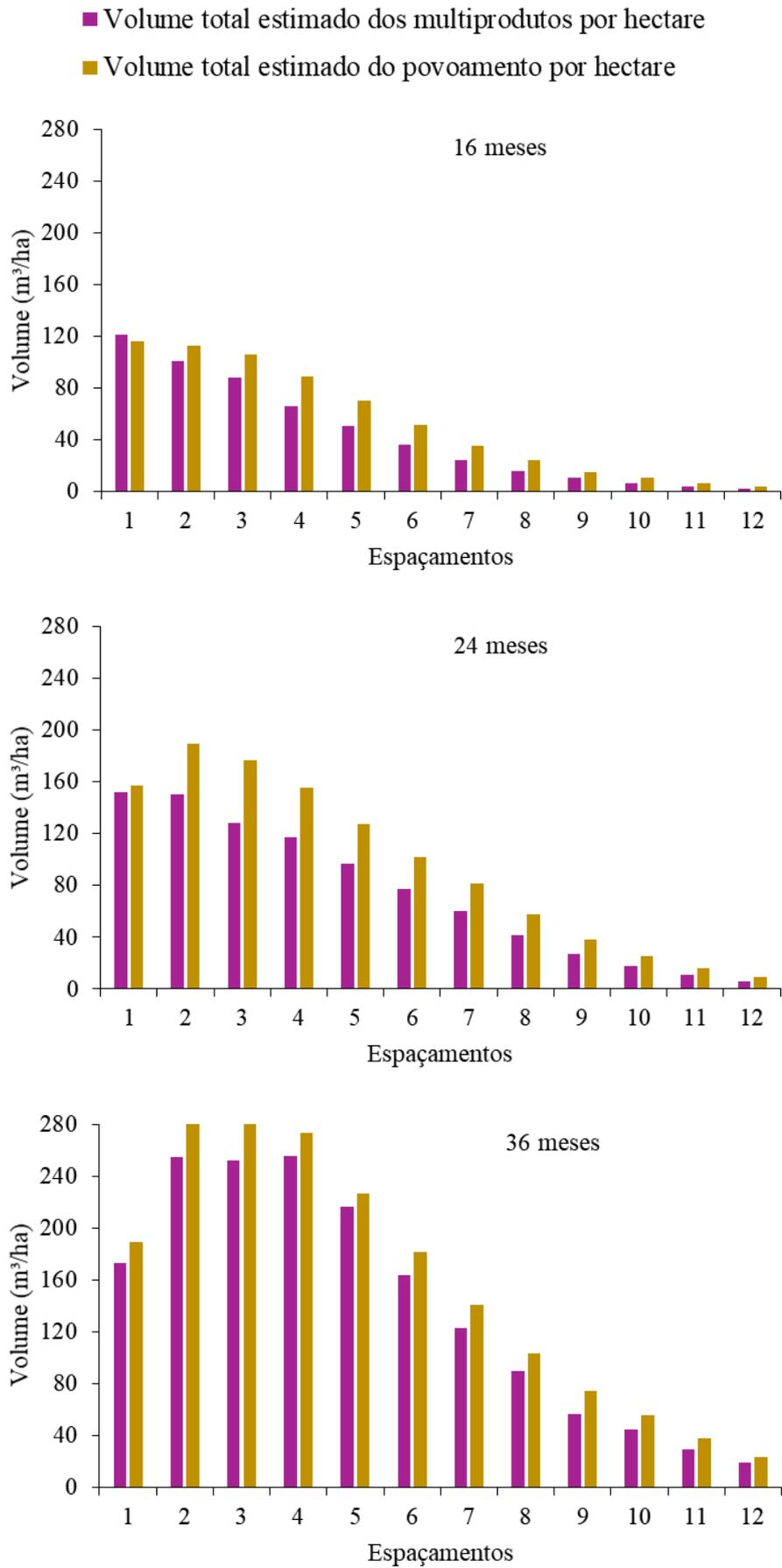


Figura 13. Volume total estimado para a produção de biomassa do povoamento por hectare e volume total estimado dos multiprodutos por hectare obtidos a partir da otimização.

Tabela 9. Estimativa média de volume (m³) por árvore individual e estimativa de volume (m³) por hectare para cada espaçamento, em cada idade.

Espaçamentos	Idades (meses)					
	16		24		36	
	(m ³ /árvore)	(m ³ /ha)	(m ³ /árvore)	(m ³ /ha)	(m ³ /árvore)	(m ³ /ha)
E1	0,0065	116,088	0,0093	157,322	0,0154	189,141
E2	0,0093	113,246	0,0163	189,171	0,0311	306,549
E3	0,0121	105,933	0,0211	176,893	0,0356	280,059
E4	0,0161	89,361	0,0279	155,646	0,0486	273,182
E5	0,0188	70,741	0,0348	127,315	0,0610	226,100
E6	0,0201	51,351	0,0403	101,969	0,0705	181,345
E7	0,0200	35,521	0,0456	81,060	0,0797	140,541
E8	0,0199	24,608	0,0466	57,282	0,0864	103,433
E9	0,0192	15,392	0,0466	37,856	0,0931	74,236
E10	0,0195	10,627	0,0478	25,728	0,1032	55,877
E11	0,0179	6,754	0,0432	16,142	0,1016	37,334
E12	0,0163	4,021	0,0377	9,329	0,0952	23,449

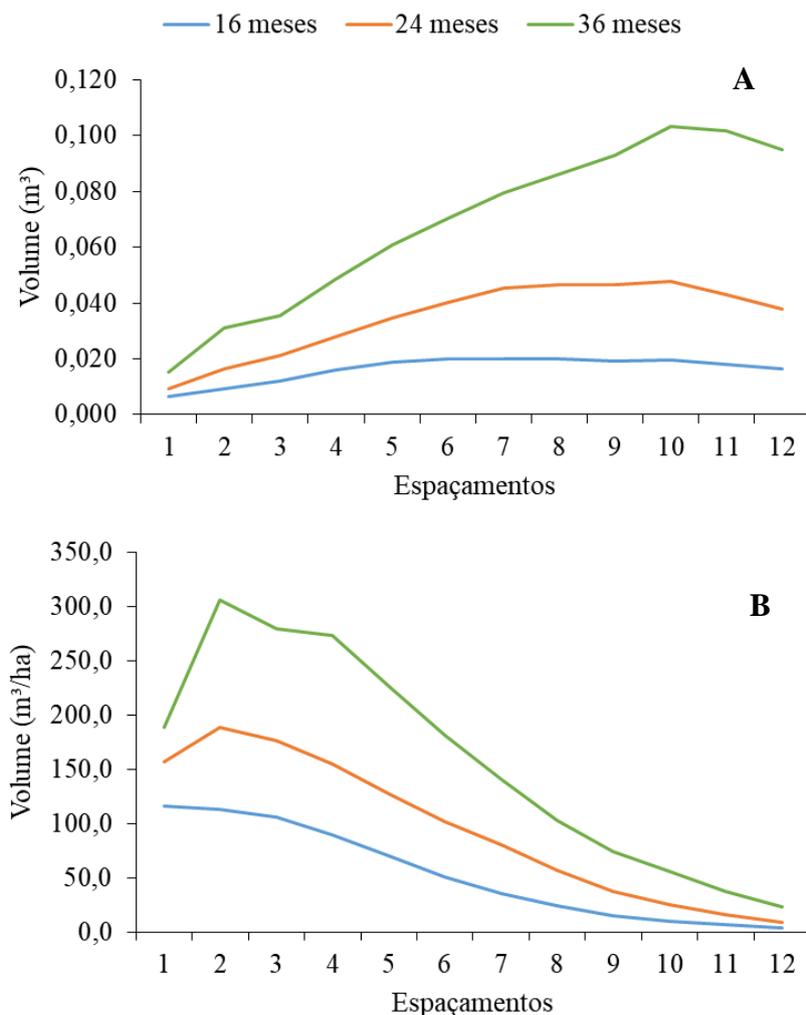


Figura 14. Tendência das estimativas de volume individual (m³) por árvore (A) e volume total do povoamento (m³/ha) por hectare (B) para todos os espaçamentos em cada idade.

As estimativas de volume individual por árvore e volume total do povoamento por hectare apresentam tendências diferentes (Figura 13), observando que com aumento da área útil por planta o volume individual por árvore apresenta comportamento crescente e o volume total do povoamento por hectare decresce com o aumento do espaçamento.

Com aumento do espaçamento, o volume estimado para o povoamento total por hectare diminui em consequência ao número de indivíduos na área. Os espaçamentos 1 (0,50 m²) e 2 (0,77 m²), os quais possuem áreas úteis por árvore próximos, apresentaram valores diferentes de volume individual (m³/árvore) e para povoamento total (m³/ha), destacando-se na idade de 36 meses, a qual o espaçamento 1 tem produção total (m³/ha) aproximadamente 40% menor.

Corroborando ao encontrado nesse estudo, Forrester et al., 2013 observou que valores de diâmetro da árvore e área transversal do maior diâmetro foram maiores em densidades de plantios mais baixas, enquanto que a área basal do povoamento total foi maior em densidades de plantios mais elevadas.

A diminuição do volume total estimado por hectare para o povoamento do espaçamento 1 (0,50 m²/árvore), principalmente na idade de 36 meses, deve-se a desaceleração da taxa de crescimento em altura e área basal em resposta a intensa competição entre as árvores. Schneider et al. (2015) afirma que em uma população, com o passar do tempo, a competição aumenta resultando em dominação e mortalidade de árvores.

Binkley et al. (2002) afirmam que o declínio da produção está relacionado com a idade, pois o crescimento florestal é dependente de mudanças relacionadas à competição por recursos, pois havendo alteração na eficiência do uso de recursos por árvores individuais afetará diretamente na estrutura do povoamento (crescimento, mortalidade etc.).

As mudanças na estrutura do povoamento e na eficiência das árvores individuais ao longo do tempo resultam no declínio significativo do nível de produção do povoamento (SMITH; LONG, 2001).

Tabela 10. Estimativa da Receita Total por hectare para o povoamento convertido em multiprodutos ou em lenha.

		Idades (meses)					
		16		24		36	
		Multiprodutos (R\$/ha)	Lenha (R\$/ha)	Multiprodutos (R\$/ha)	Lenha (R\$/ha)	Multiprodutos (R\$/ha)	Lenha (R\$/ha)
Espaçamentos	E1	50.910,73	5.223,95	70.059,80	7.079,49	83.748,01	8.511,33
	E2	47.554,85	5.096,06	76.214,90	8.512,68	130.388,27	13.794,69
	E3	49.064,22	4.766,98	68.707,83	7.960,16	125.906,20	12.602,66
	E4	36.749,82	4.021,24	60.441,95	7.004,09	123.162,27	12.293,17
	E5	26.864,90	3.183,37	48.503,87	5.729,16	101.167,18	10.174,51
	E6	19.383,95	2.310,80	37.787,93	4.588,60	74.854,76	8.160,53
	E7	12.920,95	1.598,45	28.828,44	3.647,70	54.980,02	6.324,34
	E8	8.910,43	1.107,37	19.728,94	2.577,68	38.718,57	4.654,49
	E9	5.916,28	692,63	12.775,09	1.703,53	24.096,95	3.340,64
	E10	3.692,41	478,23	8.316,60	1.157,74	18.204,34	2.514,45
	E11	2.195,77	303,94	4.994,73	726,38	11.954,63	1.680,03
	E12	1.431,49	180,95	2.894,62	419,79	7.589,14	1.055,20

Em avaliação ao retorno financeiro para as alternativas para produção destinada a multiprodutos e a produção do povoamento ser destinada ao uso único de lenha, para todos os espaçamentos, nas idades avaliadas, o melhor uso e conversão dos fustes em múltiplos produtos (Tabela 10).

Na alternativa de toda a produção do povoamento ser destinada ao uso único de lenha (energia), aplicando o valor de R\$45,00/m³ à Receita Total/ha, os maiores valores foram encontrados na idade de 36 meses para os espaçamentos E2, E3, E4 e E5, apresentando os valores R\$13.794,69; R\$12.602,66; R\$12.293,17; R\$10.174,51, respectivamente.

Para a produção do povoamento destinada a multiprodutos o espaçamento mais rentável por ano é o E2 aos 36 meses, retornando uma receita de R\$130.388,27, seguido do E2 aos 24 meses (R\$76.214,90) e do E1 aos 16 meses (R\$50.910,73).

A produção do povoamento quando destinada para multiprodutos, proporciona um retorno financeiro maior quando destinada a um uso energético.

A otimização dos fustes em multiprodutos permitiu uma valoração de até 89% a mais em relação a valoração apenas para lenha, valor obtido no espaçamento E2 na idade de 36 meses com uma receita de R\$130.388,27. Comprovando assim, que é mais lucrativo otimizar a produção do povoamento em multiprodutos.

Os valores de receita apresentados (Tabela 10) apresentam uma estimativa de maior retorno financeiro para a produção final da floresta quando convertida em multiprodutos, mas cabe ressaltar que é necessário estudo específico economicamente levando em consideração os custos gastos com as transformações dos produtos.

Soares et al., 2003 avaliando um povoamento de *Eucalyptus grandis* com 7 anos de idade a fim de comparar a rentabilidade quando se explora o povoamento florestal para produção de um único produto *versus* a produção florestal para multiprodutos, observaram maior rentabilidade econômica quando a produção do povoamento é destinada para multiprodutos (madeira para serraria e madeira para geração de energia) quando destinada apenas para único uso (madeira para geração de energia).

Estudos que envolvem a viabilidade econômica de projetos avaliando o rendimento em função do sortimento da produção final confirmam a superioridade do retorno financeiro que pode ser obtido quando a produção do povoamento é destinada para multiprodutos (SOARES et al., 2003; CASTRO et al., 2011).

A tendência é que os povoamentos sejam manejados segundo o conceito de florestas para multiprodutos, sendo que um mesmo fuste de uma árvore obtenha-se madeira para diferentes produtos (laminação, serraria, fabricação de papel e celulose) e ainda aproveitar os resíduos da madeira para outros aproveitamentos (fabricação de chapas de fibras e geração de energia), sendo a alternativa que possa possibilitar um maior retorno financeiro de produtos advindos de povoamentos florestais (SOARES et al., 2003).

4. CONCLUSÃO

Menores espaçamentos proporcionam maiores volumes totais estimados devido ao grande número de árvores por hectare.

Povoamento com produção destinada ao uso múltiplo da madeira proporciona maior retorno financeiro do que quando destinado a uso único.

A otimização de multiprodutos permitiu a valoração de até 89% a mais em relação a valoração apenas para lenha.

Para curta rotação de eucalipto (36 meses), os espaçamentos E2 (0,77 m²/árvore), E3 (1,17m²/árvore) e E4 (1,76m²/ árvore) podem proporcionar um maior retorno financeiro em relação a outros espaçamentos em resposta ao grande números de árvores por hectare, sendo este retorno desconsiderando os custos para a conversão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4ªed.: Editora UFV. Viçosa-MG, 2013. 605p.

CASTRO, R. V. O.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SOARES, C. P. B.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; CASTRO, A. F. N. M.; CRUZ, J. P.; SANTOS, F. L.; SOUZA, C. C. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 351-357, 2011.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de Biometria Florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269p.

FORRESTER, D. I.; WIEDEMANN, J. C.; FORRESTER, R. I.; BAKER, T. G. Effects of planting density and site quality on mean tree size and total stand growth of *Eucalyptus globulus* plantations. **Can. J. For. Res.** n. 43, p. 846–851, 2013.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. **Forest Chronicle**, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; REIS, G. G.; MOREIRA, A. M. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.

NELDER, J. A. New kinds of systematic designs for spacing experiments. **Biometrics**, n.18, p.283-307, 1962.

OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M.; Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.60, p.1-9, 2009.

OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; 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.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José: IICA, 1997. 561p.

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

SMITH, F. W.; LONG, J. N. Age-related decline in forest growth: an emergent property. **Forest Ecology and Management**. v.1, n. 3, p. 175–181, 2001.

SNIF-Sistema Nacional de Informações Florestal. Produção Florestal. **Boletim SNIF 2017**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, v. 1, 2017.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.6, p.811-820, 2003.

TEO, S. J.; MARCON, A.; EHLERS, T.; BIANCHI, J. C.; PELOSO, A. NAVA, P. R.; COSTA, R. H. Modelos de afilamento para *Pinus elliottii* em diferentes idades, na região de Caçador, SC. **Floresta**, Curitiba, v.43, n.3, p.439-452, 2013.