

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL**

RAFAEL RIBEIRO SOUZA

**ESTUDO DA FORMA DO FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

**DIAMANTINA-MG
2013**

RAFAEL RIBEIRO SOUZA

**ESTUDO DA FORMA DO FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Manejo Florestal e Silvicultura, para a obtenção do título de “Mestre”.

**Orientador: Prof. Dr. Gilciano Saraiva
Nogueira-UFVJM**

**Coorientador: Prof. Dr. Marcio Leles
Romarco de Oliveira-UFVJM**

**DIAMANTINA-MG
2013**

Catalográfica - Serviço de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecária: Jullyele Hubner Costa CRB-6/2972

Souza, Rafael Ribeiro
S729e 2013 Estudo da forma do fuste de árvores de eucalipto em diferentes
espaçamentos. / Rafael Ribeiro Souza. – Diamantina: UFVJM, 2013.
87 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Gilciano Saraiva Nogueira
Coorientador: Prof. Dr. Marcio Leles Romarco de Oliveira

Dissertação (mestrado) –Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri. Faculdade de Ciências Agrárias. Mestrado -
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, 2013.

1. Arranjos espaciais. 2. Identidade de modelos. 3. Redes neurais
artificiais. 4. Sólidos de revolução. I. Nogueira, Gilciano Saraiva. II.
Oliveira, Marcio Leles Romarco de. III. Título.

CDD 634.973766

Elaborada com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ESTUDO DA FORMA DO FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

Rafael Ribeiro Souza

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Manejo Florestal e Silvicultura, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA EM 09 / 08 / 2013

Prof. Dr. Helio Garcia Leite - UFV
Membro

Prof. Dr. Mayra Luiza Marques da Silva Binoti - UFVJM
Membro

Prof. Dr. Christovão Pereira Abrahão - UFVJM
Membro

Prof. Dr. Marcio Leles Romarco de Oliveira - UFVJM
Co-orientador

Prof. Dr. Gilciano Saraiva Nogueira - UFVJM
Presidente

**DIAMANTINA-MG
2013**

Dedico:

*A meus pais, Maria Helena e Paulo Cesar
e as minhas irmãs Isabela e Ludmila,
por estarem sempre presentes,
me apoiando e por acreditarem no meu potencial.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar saúde e determinação em todos os dias de minha vida;

Aos meus pais e minhas irmãs, pelo exemplo de determinação e pela confiança que sempre depositaram em mim, divido este título com vocês;

A meu avô, tios (as), e primos (as), em especial ao meu tio José de Castro, pelo apoio e por apostarem nesta conquista;

Em especial a minha namorada Emile por estar sempre junto a mim;

Ao amigo André Cabral pela amizade e pelo incentivo;

Ao professor Gilciano, pela orientação, amizade e, pela referência intelectual;

Ao professor Marcio Leles, por sempre estar disposto em fornecer esclarecimentos quando solicitado e pela amizade;

Ao amigo Eduardo Pelli pela amizade e pela ajuda incondicional em parte do processamento de dados e por ceder seu aplicativo para eu fosse utilizado;

Aos “irmãos de coração”, Bruno Silva e Leônidas Soares muito obrigado pela amizade e ao auxílio incondicional sempre e, sobretudo na colaboração da construção de meu caráter profissional e, pelo exemplo de profissionais que são;

Aos amigos do mestrado, Andrei, Danilo Marques, Danillo Lobo, Erik Paulino, Jadir Silva, Emílio e Petrônio, pelo auxílio na elaboração deste trabalho;

Aos amigos, Jorge Augusto, João Paulo, Hernando Henrique, Arthur Pedro, Randal, Ricardo Felix, Daniel e “Vado” pela amizade e pelos bons momentos de convivência;

Aos professores da banca examinadora, Prof. Dr. Helio Garcia Leite, Prof. Dr. Mayra Luiza Marques da Silva Binoti e o Prof. Dr. Christovão Pereira Abrahão pelas valiosas contribuições;

Ao engenheiro Marcelo Müller e ao professor Laércio Couto, por serem os responsáveis pela instalação do experimento e terem cedido os dados;

À APERAM Bioenergia Ltda, e pelo apoio a pesquisa;

Ao engenheiro Fabiano Lourenço dos Santos e a VOTORANTIM SIDERURGIA por fornecer parte dos dados que também fazem parte deste trabalho;

À UFVJM e CAPES, pela concessão das bolsas de estudo;

Aos professores e a todos os funcionários das instituições que estudei ao longo de minha vida, em especial a Escola Estadual Padre Afonso de lemos e a UFVJM-DEF, que contribuíram com minha formação intelectual.

*É melhor tentar e falhar
que preocupar-se e ver a vida passar.
É melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo o nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder
prefiro ser feliz, embora louco,
quem em conformidade viver.”*

Martin Luther King

RESUMO

SOUZA, R. R. **Estudo da forma do fuste de árvores de eucaliptos em diferentes espaçamentos**. 2013. 87p. (Dissertação - Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

RESUMO - Os objetivos deste estudo foram: avaliar o efeito do arranjo espacial de plantio na forma do fuste de árvores de eucalipto; avaliar se as redes neurais artificiais estimam com precisão o afilamento, os diâmetros ao a qualquer altura especificada e as alturas a qualquer diâmetro especificado em fustes de eucalipto; estudar a forma dos fustes em arvores de eucalipto em diferentes arranjos espaciais e idades, e de maneira específica, determinar as formas geométricas aproximadas, que ocorrem ao longo destes fustes e as suas proporções em relação à altura total. Foram utilizados dados de um experimento implantado em dezembro de 2002, no delineamento em blocos (três blocos), sendo testados os arranjos espaciais de 3,0 x 0,5; 3,0 x 1,0; 3,0 x 1,5; 3,0 x 2,0 e 3,0 x 3,0 m. Foram utilizados também, dados de árvores provenientes de um sistema agroflorestal-SAF, plantio com 6,03 hectares, implantado em dezembro de 1993, no arranjo espacial de 10,0 x 4,0 m. Para analisar a forma média dos fustes foram utilizados modelos de Kozak, Schöepfer, Garay, Demaerschalk e Ormerod. Os modelos selecionados foram de Garay e de Shöepfer. A escolha foi feita com base nas estatísticas, coeficiente de correlação, erro-padrão residual, *Bias* e da análise gráfica dos resíduos. Testes de identidade de modelos foram aplicados nos modelos selecionados com a finalidade de verificar a igualdade entre a forma dos fustes. Foram utilizadas redes neurais artificiais *feed-forward*, do tipo *Multilayer Perceptrons*, treinadas por meio do algoritmo *error-backpropagation*. Para os ajustes das redes foi utilizada uma aplicação computacional em linguagem Java, e para as funções destinadas ao treinamento e aplicação foi utilizada a biblioteca Weka. As estatísticas de acurácia utilizadas para avaliar as melhores redes foram a raiz quadrada do erro médio e as correlações entre os valores observados e os valores estimados. Utilizando a equação geral das curvas, buscou-se determinar a forma aproximada do sólido geométrico médio dos fustes e descrever as formas geométricas aproximadas que os fustes assumem ao longo de seu comprimento, determinar os seus pontos aproximados de inflexão e a proporção de cada forma em relação à altura total. O modelo de Garay é o mais indicado para descrever o *taper* de eucaliptos nos arranjos espaciais avaliados. Foi aceita a hipótese de nulidade no teste de identidade de modelos não linear, indicando a igualdade entre as equações nos arranjos de 3,0 x 0,5 e 3,0 x 1,0 m. Para uma distância de 3,0 metros entre fileiras, quanto maior a distância entre plantas, mais cônica é a forma do fuste. A rede neural

artificial estimou com precisão o afilamento dos fustes, distinguindo as variações na forma dos fustes em virtude dos diferentes arranjos espaciais. A rede neural artificial estimou com precisão os diâmetros a qualquer altura especificada. As estimativas das alturas a qualquer diâmetro especificado, obtidas pela RNA e pelo modelo de *taper* de Garay, apresentaram valores de erros percentuais acentuados na base dos fustes, em todos os arranjos espaciais. Os fustes nos arranjos de 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, apresentaram a forma média de um parabolóide, já os fustes no arranjo de 10,0 x 4,0 m, a forma média de um tronco de cone. Os fustes nos arranjos espaciais 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide, um tronco de cone e um parabolóide, nas proporções de 10,96; 43,81 e 45,14 %, e de 14,58; 37,76 e 47,66 %, respectivamente. Os fustes referentes ao arranjo espacial 10,0 x 4,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide e de um tronco de cone, nas proporções de 20,78 e 79,30 %, respectivamente, em relação à altura total.

Palavras chave: Arranjos espaciais, Identidade de modelos; Redes neurais artificiais; Sólidos de revolução.

ABSTRACT

SOUZA, R. R. **Study of stem form of *Eucalyptus* sp. trees in different planting densities.** 2013. 87p. Dissertation (Masters in Forest Science) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

ABSTRACT - The objectives of this study were: assess the effect of the planting's spatial arrangement in the bole form of eucalypt trees; evaluate whether artificial neural networks estimate the tapering with accuracy, the diameters at any specified height and the heights at any specified diameter in eucalypt boles; study the boles' form in eucalypt trees in different spatial arrangements and ages, and in a specific manner, determine the approximate geometric shapes that occur along these boles and their proportions in relation to the total height. There were utilized data from an experiment established in December 2002, in blocks design (three blocks), being tested the spatial arrangements of 3,0 x 0,5; 3,0 x 1,0; 3,0 x 1,5; 3,0 x 2,0 and 3,0 x 3,0 m. There were also used, tree data from an agroforestry system-AFS, with 6,03 hectares of planting, established in December 1993, with spatial arrangement of 10,0 x 4,0 m. To analyze the average forms of the boles, there were used Kozak, Schöepfer, Garay, Demaerschalk and Ormerod models. The selected models were Garay and Shöepfer. The selection was made based on the statistics, correlation coefficient, residual standard error, Bias and graphical analysis of the residuals. Models identity tests were applied on the selected models in order to verify the equivalence between the shape of the boles. There were used feed-forward artificial neural networks, Multilayer Perceptron type, trained by the error-backpropagation algorithm. To adjust the networks it was utilized a computational application in Java language, and for the functions intended for training and application it was used the Weka library. The accuracy statistics used to evaluate the best networks were the root mean square error and the correlations between the observed and estimated values. Using the general equation of the curves, it aimed to determine the approximate shape of the mean geometric solid for the boles and describe the approximate geometric shapes that the boles assume along their length, determine their approximate inflection points and the proportion of each form in relation to the total height. The Garay model is the most suitable to describe the taper of eucalypts in the evaluated spatial arrangements. It was accepted the null hypothesis in the identity test of nonlinear models, indicating equality between the equations in the arrangements of 3,0 x 0,5 and 3,0 x 1,0 m. For a distance of 3,0 m between the rows, the greater the distance between plants is, more conical shaped is the bole. The artificial neural

network estimated with accuracy the tapering of the boles, distinguishing variations in the form of the boles due to the different spatial arrangements. The artificial neural network estimated with accuracy the diameters at any specified height. The estimates heights at any specified diameter, obtained by the ANN and taper model of Garay, presented values of percentage errors accentuated at the base of the boles, in all spatial arrangements. The boles in the arrangements of 3,0 x 0,5 and 3,0 x 3,0 m, presented the mean form of a paraboloid, while the boles in the arrangement of 10,0 x 4,0 m, the mean form of a conic trunk. The boles in the spatial arrangements 3,0 x 0,5 and 3,0 x 3,0 m, assume the forms of a neiloid trunk, a conic trunk and a paraboloid, in the proportions of 10,96; 43,81 and 45,14 %, and of 14,58; 37,76 and 47,66 %, respectively. The boles for the spatial arrangement of 10,0 x 4,0 m, assume the forms of a neiloid trunk and a conic trunk, in the proportions of 20,78 and 79,30 %, respectively, in relation to the total height.

Keywords: Spatial arrangement; Identity of models; Artificial neural networks; Solid of revolution.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Forma dos fustes e modelos de <i>taper</i>	13
2.2 Densidade do povoamento e forma dos fustes	15
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
CAPÍTULO I- FORMA DE FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM PLANTIOS ADENSADOS	24
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. OBJETIVOS.....	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Utilização da equação geral das curvas para estimar a forma média dos fustes	28
3.2 Testes de Identidade de Modelos	29
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 Utilização da equação geral das curvas para estimar a forma média dos fustes	33
4.2 Teste de identidade de modelos	36
5. CONCLUSÕES	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CAPÍTULO II- ESTUDO DO <i>TAPER</i> DE ÁRVORES DE EUCALIPTO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	45
1. INTRODUÇÃO.....	46
2. OBJETIVOS.....	47
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5. CONCLUSÕES	62
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
CAPÍTULO III- ESTUDO DA FORMA GEOMÉTRICA DE FUSTES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTIO	66
1. INTRODUÇÃO.....	67
2. OBJETIVOS.....	68
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5. CONCLUSÕES	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
CONCLUSÕES GERAIS	84
APÊNDICE	85

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma área total de aproximadamente 7 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais cerca de 70,0 % são florestas de eucalipto e cerca 23,0 % são de pinus. A área ocupada pelos plantios de outras espécies, como Teca, Acácia, Araucária, Pópulus, Seringueira, Paricá, entre outras, representam cerca de 7,0 % da área total. Os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se destacaram no cenário nacional como os estados detentores de cerca de 88,0 % da área total de plantios florestais, sendo o estado de Minas Gerais o que detém a maior área plantada, correspondente a aproximadamente 23,0 % do total (ABRAF, 2012).

As plantações florestais brasileiras impulsionam cadeias produtivas que agregam valores aos produtos e trazem reflexos importantes para a economia do país (CALAIS 2009, citado por ROCHA, 2011). A destinação dos produtos divide a cadeia produtiva da madeira em dois grupos: o primeiro integrado pelos setores da indústria de base florestal como os serrados, painéis e polpas e o outro destinado à produção de madeira para fins energéticos. O rápido crescimento, variabilidade ao uso, adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (INFORME AGROPECUÁRIO, 2008) e a alta produtividade dos povoamentos foi um dos principais fatores que determinaram sua expansão nestes mercados (DOSSA et al., 2002).

Diante da grande demanda atual pela madeira e seus multiprodutos, torna-se necessário o emprego de modelos que permitam estima-los com exatidão. Para isto, são empregados os modelos de afilamento ou *taper* (HUSCH et al., 1993). Existem diferentes tipos de modelos de afilamento, sendo os mais eficientes aqueles não lineares e compatíveis (CAMPOS e LEITE, 2013).

A escolha da correta densidade de árvores por unidade de área tanto no plantio como ao longo do ciclo da floresta é um dos principais aspectos envolvidos no manejo florestal, pois influenciará diretamente no crescimento individual e conjunto das árvores. A densidade, determinada pelas distâncias entre linhas e entre plantas, é muito estudada devido à constante introdução de novas espécies, procedências e clones, e também à expansão de novos projetos florestais (STAPE, 1995).

Geralmente os plantios de eucalipto realizados no Brasil, seja com fins energéticos ou para algum setor de base da indústria, são utilizados arranjos espaciais convencionais entre 3,0 x 2,0 e 3,0 x 3,0 m, correspondendo uma área útil entre 4,0 e 9,0 m² por árvore e por este motivo os estudos sobre o afilamento dos fustes se referem a estes arranjos Finger et al.

(1995), Pires e Calegario (2007), Souza et al. (2008a), Souza et al. (2008b), Miguel et al. (2011).

Até meados da década de 90 os arranjos espaciais mais comumente plantados no Brasil eram 2,0 x 2,0; 2,5 x 2,0; 3,0 x 1,5; 3,0 x 2,0 e 3,0 x 2,5 m. A partir dali, têm sido testado diferentes densidades de plantios variando também os arranjos espaciais com o intuito de aumentar a produtividade florestal e diminuir os custos de produção (ASSIS et al., 1999).

Nos estudos envolvendo espaçamentos adensados e arranjos espaciais geralmente são avaliadas a sua influência na produção de biomassa nos diferentes componentes das árvores, no diâmetro, na altura e no volume total dos povoamentos, Bernardo (1995), Palha Leite et al. (1997), Assis et al. (1999), Ladeira et al. (2001), leles et al. (2001), Berger et al. (2002), Müller et al. (2005a), Pérez-Cruzado et al. (2011), Santos (2011). Há uma carência de estudos relacionados à forma dos fustes em povoamentos adensados.

A forma do fuste em árvores conduzidas em espaçamentos adensados torna-se importante principalmente na ocasião de uso múltiplo da floresta. O estudo da forma é fundamental para determinar e identificar os sortimentos do fuste e do povoamento (FINGER et al., 1995). Avaliar o comportamento de como é alocado o incremento de matéria seca (ou madeira) no fuste nestas condições, torna-se importante, pois, trata-se do componente da árvore que é comercializado, e é de grande importância na tomada de decisões do manejador quanto à escolha de material genético e das técnicas de manejo na condução do povoamento (LELES et al., 2001).

O efeito da variação na forma dos fustes em relação ao espaçamento pode ser confirmada nos estudos de Larson (1963), Friedl (1989), Assmann (1970), Balloni (1983) e Opie et al. (1984), citados por Schonau e Coetzee (1989), Kramer (1988), Sterba (1988), Baldwin et al. (2000), Nogueira et al. (2008) e Rance et al. (2012).

Os fustes podem assumir as mais diferentes formas geométricas ao longo de seu comprimento, Row e Guttenberg (1966), Hohenadl, citado por Silva (1974), Husch et al. (2003), Machado e Figueiredo Filho (2003), consideraram que no sentido base topo o fuste pode ser constituído por uma combinação ou uma sequência de formas que se aproximam de diferentes sólidos geométricos, como um cilindro, tronco de neilóide, parabolóide e tronco cone, e que raramente eles apresentam algumas dessas formas em seu todo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Forma dos fustes e modelos de *taper*

O estudo da forma do fuste de árvores de espécies florestais constitui um aspecto parcial, porém, não menos importante da ciência florestal (FRIEDL, 1989).

Segundo SPURR (1952), foi Schuberg que em 1881 introduziu o conceito de quociente de forma como a relação entre dois diâmetros tomados, respectivamente, a metade da altura da árvore e, a 1,30 metros do solo, desenvolvendo-se, a partir daí uma série de pesquisas sobre forma de tronco para definição de sortimentos de madeira.

A primeira tentativa de expressar a forma média do tronco através de uma equação matemática e estatística ocorreu com Höjer (1903), citado por Behre (1923). Desde então os estudos sobre a modelagem da forma do fuste das árvores vêm sendo desenvolvidos. Autores como Jonson (1911), Behre (1923, 1927) e Matte (1949), dentre outros, estudaram, de maneira pormenorizada, a possibilidade de a forma da árvore ser representada por expressões matemáticas e, ou, estatísticas (PIRES e CALEGARIO, 2007).

Hohenadl, citado por Silva (1974), mostrou que as árvores dominantes desenvolviam na base maior incremento relativo que o necessário, a fim de poderem suportar o peso do tronco. Com isso, concluiu que, de maneira geral, as árvores não apresentam uma forma homogênea, característica da espécie, mas assumem diversas formas em função das variáveis genéticas, ambientais e silviculturais.

Chapman e Meyer (1949), Loetsch et al. (1973) e Husch et al. (1982), concluíram que a forma do tronco é basicamente descrita como um neilóide na base, um parabolóide no meio e um cone no topo. Row e Guttenberg (1966), verificaram que os fustes das árvores raramente apresentam uma forma exata e sim uma combinação destas formas. Husch et al. (1993), ao considerar o fuste da árvore como um todo, também concluíram que raramente eles apresentam algumas dessas formas geométricas em seu todo. Dessa maneira, consideraram que o fuste no sentido base topo é constituído por uma sequência de diferentes sólidos geométricos: cilindro, tronco de neilóide, parabolóide e tronco cone.

Segundo Husch et al. (2003), os fustes assumem frequentemente as formas de neilóides, cones, ou parabolóides. Porém, eles raramente são exatamente cones, parabolóides, ou neilóides. Em geral, ficam entre o cone e o parabolóide. É mais realístico, considerar o fuste de uma única árvore sendo um composto de sólidos geométricos. Por exemplo, quando o fuste é cortado em toras ou toretes, o topo aproxima-se na forma de um tronco de cone ou um

parabolóide, a secção central aproxima-se de troncos de parabolóide, ou em alguns casos, de troncos de cone ou cilindro, e a base aproxima-se a um tronco de neilóide, embora, para fins práticos muitas vezes ela seja considerada um cilindro.

Machado e Figueiredo Filho (2003), afirmaram que os fustes podem assumir as mais diferentes formas, desde aquelas perfeitamente assimiláveis a uma figura geométrica, caso das coníferas, até aquelas com formas totalmente irregulares, não comparáveis a quaisquer tipos geométricos, como é o caso de árvores tortuosas típicas do cerrado.

Segundo Borges (1981), a forma da árvore, do seu tronco ou fuste, genericamente é a sua configuração externa que, a rigor, não se identifica com a forma de um sólido geométrico específico, mas com vários, segundo a porção do tronco considerada. Este mesmo autor, ainda afirma que as formas representando o neilóide, parabolóide e cone, raramente são encontradas e os limites entre esses diferentes sólidos são de difícil determinação, e que essa aproximação, no entanto, desempenha um importante valor teórico na definição de uma expressão matemática que descreva a forma do fuste.

Conforme Silva (1974), aliando-se certos sólidos geométricos de revolução às formas naturais das árvores, consegue-se determinar o seu volume comercial. Observa-se ainda, que esses sólidos geométricos foram e são frutos de pesquisas, numa tentativa de solucionar o problema da cubagem de árvores através de recursos procedentes da matemática, é conforme Finger (1992), que as secções são consideradas sempre circulares ao longo do fuste.

A forma do fuste é afetada pelo crescimento e este pelo ambiente (FINGER et al. 1995). A variação da forma do fuste ocorre tanto em florestas naturais como em plantadas (MÜLLER, 2004). Essas variações podem ocorrer em função da espécie, espaçamento, tratos culturais, posição sociológica, idade, manejo e sítio (FINGER et al., 1995), em função de diferentes materiais genéticos, da prática de desbastes (CAMPOS e LEITE, 2013), e até da intensidade do vento que age sobre a copa (SCHNEIDER, 1993). Ainda dentro de um mesmo povoamento, a forma pode variar de árvore para árvore (KILKKI, 1983; TASSISA e BURKHART, 1998; EERIKÄINEN, 2001).

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).

Vários são os modelos de *taper* existentes e a utilização de um modelo específico dependerá da qualidade de seu ajuste frente ao conjunto de dados, que deverá ser avaliada pelo manejador. Conjunto de dados distintos geralmente tem características próprias, portanto,

provavelmente vão resultar no emprego de diferentes modelos, daí a necessidade de sempre se testar um variado conjunto de modelos quando se trata de dados novos. De acordo com Lima (1986), o melhor ou o pior desempenho dos modelos de *taper* está na dependência das características da população para a qual se pretende empregá-los e das pressuposições básicas para as quais cada modelo foi desenvolvido. Esse fato justifica a sua constante avaliação para o uso em condições específicas.

2.2 Densidade do povoamento e forma dos fustes

A densidade de um povoamento é a expressão quantitativa da população de indivíduos por unidade de área e pode ser descrita pela área basal e frequência de forma isolada ou associada a outras variáveis para definir o espaço horizontal (SCHNEIDER, 1993).

O espaçamento pode influenciar várias características quantitativas e qualitativas das árvores e o seu crescimento, em particular no diâmetro (SHIMOYAMA e BARRICHELO, 1989; BRASIL e FERREIRA, 1971; MELLO et al., 1976; COELHO et al., 1970).

Espaçamentos em plantios de eucalipto dependem da espécie, clima, sítio, objetivo do manejo, técnicas silviculturais, método de corte e rotação. Que por sua vez afetam o fechamento das copas, a competição, a taxa de crescimento da árvore, a produção de madeira, o conteúdo de madeira juvenil, as operações silviculturais como capina e desbaste, o equipamento de mecanização, os métodos de exploração, os custos em geral, e a rotação (PENFOLD e WILLIS, 1961; BARRETT et al., 1975; BALLONI, 1983; KELLISON, 1983; SIMÕES, 1983, citados por SCHONAU e COETZEE, 1989).

O espaçamento tem uma série de implicações do ponto de vista silvicultural, tecnológico e econômico na elaboração de projetos florestais: interfere nas taxas de crescimento e sobrevivência das plantas, no volume de copa e galhos, na qualidade da madeira, na porcentagem de casca, na idade de corte, bem como nas práticas de colheita e manejo florestal e, conseqüentemente, nos custos de produção florestal (SIMÕES et al., 1976; STAPE et al., 1988; LELES et al., 1998; MARQUEZ, 1997; COUTO et al., 2002).

Árvores que crescem em espaçamento aberto apresentam maior incremento em diâmetro nas partes inferiores do tronco diminuindo, esta taxa, ao longo do mesmo à medida que aumenta a altura. Com isso são gerados troncos de base maior e com maior estabilidade. Ao contrário, quando o povoamento fecha o dossel e as copas concorrem entre si, o máximo incremento se desloca para cima, dando origem a troncos com uma tendência mais cilíndrica (ASSMANN, 1970; KRAMER, 1988; STERBA, 1988).

Em geral os autores que analisaram o efeito da densidade sobre a forma dos fustes de árvores, evidenciaram que povoamentos densos acarretam um decréscimo no comprimento da copa, e conseqüentemente as árvores apresentam formas mais cilíndricas (LARSON 1963; FRIEDL, 1989).

Segundo Baldwin et al. (2000), é esperado que árvores plantadas em maiores espaçamentos iniciais apresentem fustes mais cônicos, em comparação com árvores sob espaçamentos mais reduzidos.

A produtividade florestal pode estar intrinsecamente relacionada à disponibilidade de água, profundidade do solo, temperatura, nutrientes e luz disponíveis durante o período de crescimento da planta e a disponibilidade destes fatores podem ser afetadas diretamente pelos espaçamentos e/ou arranjos espaciais adotados (STAPE, 1995).

A escolha de um determinado espaçamento ou arranjo espacial deve levar em consideração fatores como o uso final da madeira, qualidade do sítio, qualidade da madeira, equipamentos que serão utilizados na colheita da floresta, dentre outros. Espaçamentos mais amplos implicam em um aumento do volume para fins específicos, como serraria, laminação (GOMES et al., 1997) e integração lavoura-pecuária-floresta (PAULINO, 2012).

Se o povoamento é muito denso, o espaço para o crescimento de cada árvore é reduzido comprometendo o desenvolvimento radicial e da copa, e, conseqüentemente, afetando a quantidade e a qualidade da produção de madeira (SCOLFORO, 1997). De maneira geral, povoamentos conduzidos em espaçamentos menores resultam árvores com diâmetros reduzidos e com menor uma porcentagem de sobrevivência, em virtude da maior competição pelos recursos do meio. Em termos de produção total por área, eles apresentam maior área basal para uma determinada idade (COUTO, 1977; GORGULHO et al. 1991; LADEIRA, 1999; BERGER et al., 2002).

Em espaçamentos maiores a produção de matéria seca da parte aérea por árvore, em especial do fuste, geralmente é elevada em razão do maior crescimento em diâmetro das árvores, enquanto em espaçamentos mais reduzidos ocorre maior produção de biomassa por unidade de área, em razão de se ter um maior número de indivíduos por unidade de área (OLIVEIRA NETO et al., 2003).

Plantios conduzidos em um menor espaçamento, quando comparados com outros conduzidos em um maior espaçamento, atingem a capacidade do sítio mais rapidamente (ASSMANN, 1970). Porém, as diferenças iniciais de produção tornam-se cada vez menores com o avanço da idade, se anulando quando as árvores conduzidas nos locais com maior

espaçamento utilizam completamente os recursos naturais disponíveis, resultando numa produção final por hectare equivalente em todos os espaçamentos (BERGER et al., 2002).

Segundo Schneider et al. (1998), se a densidade do povoamento for muito baixa, pode-se não aproveitar todo o potencial do local, em termos de luz, nutrientes e água. Por outro lado, se a densidade for muito alta, a quantidade destes elementos disponíveis no local pode não ser suficiente para garantir o bom desenvolvimento das árvores. A adoção de espaçamentos e arranjos de plantio inadequados pode intensificar a competição intraespecífica, reduzindo a uniformidade de crescimento e aumentando a quantidade de árvores dominadas, as quais possuem uma menor eficiência de utilização dos recursos do meio comparadas às árvores dominantes (BINKLEY et al., 2002).

Os projetos implantados com *Eucalyptus* no Brasil, para um mesmo espaçamento há uma grande quantidade possível de arranjos espaciais, seja com variações das distâncias entre as linhas e/ou entre plantas (STAPE, 1995). O aumento do espaçamento pode reduzir despesas com preparo de solo, número de mudas, no consumo de fertilizantes e na colheita, contudo pode implicar em aumento dos custos de manutenção. Espaçamentos menores são recomendados em função da qualidade da madeira pretendida devendo-se ser sempre considerados os custos de produção em relação ao valor de mercado que o produto deverá assumir na colheita (SCOLFORO, 1998; OLIVEIRA, 2005). Mantendo-se a mesma densidade de plantio com variações nos arranjos podem-se identificar possibilidades de diminuição de custos de plantio e/ou manutenção florestal além de um melhor desenvolvimento das árvores em função da variação da competição pelos recursos do meio (BOTELHO, 1998).

Plantios estabelecidos no espaçamento 2,0 x 2,0 m, por exemplo, podem oferecer dificuldades à mecanização, à extração dos produtos e são de condução dispendiosa até a idade do primeiro desbaste que possibilite a obtenção de produtos comercializáveis (Coelho et al. (1970). Por este motivo, os estudos para avaliação do adensamento de plantio tem variado o espaçamento entre as árvores, e não entre as linhas de plantio, com a distância entre linhas igual ou superior a três metros LADEIRA, (1999); MÜLLER et al. (2005a); MÜLLER et al. (2005b); BERGER et al. (2002); Kruschewsky et al. (2007); Oliveira Neto et al. 2010).

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.

Antes que se faça a escolha do espaçamento e/ou arranjo de plantio deve-se fazer uma análise econômica sobre as condições de mercado para determinar qual será o mercado consumidor alvo da produção florestal, e a partir desta informação será traçado o objetivo da produção e o manejo a ser aplicado no povoamento. Em suma, pode-se dizer que o produto final desejado é o fator que determina o espaçamento de plantio a ser adotado (SMITH e STRUB, 1991; OLIVEIRA NETO et al., 2003).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS-ABPFP. Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011. Brasília, 2012. 150p.

ASMANN, E. **The principles of forest yeild study**. Oxford: Pergamon press, 1970. 506p.

ASSIS, R. L. ; FERREIRA, M. M., MORAIS, E. J. ; FERNANDES, L. A. Produção de biomassa de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake sob diferentes espaçamentos na região de cerrado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n.2, p151-156, 1999.

BALDWIN JR., V. C. et al. 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.

BEHRE, C. E. Preliminary notes on studies of tree form. **Journal Forest**, v. 21, p. 507-511, 1923.

BERNARDO, A. L. **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de três espécies de *Eucalyptus* spp sob diferentes densidades populacionais na região de cerrado de Minas Gerais**. 1995. 88f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.

BERGER, R., SCHNEIDER, P. R., FINGER, C. A. G., HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 75-87, 2002.

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

BORGES, J.F. **Seccionamento do fuste de *Pinus taeda* L. para obtenção do volume de madeira serrada através da função polinomial.** 1981. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1981.

BOTELHO, S. A. **Espaçamento.** In: SSOLFORO, J.R.S. Manejo florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998.

BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *E. alba Reinw*, *E. saligna Smith* e *E. grandis Hill* ex Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 129-149, 1971.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração florestal: Perguntas e respostas. 4 ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 605p.

CHAPMAN, H. H.; MEYER, W. H. **Forest Mensuration.** New York: McGraw-Hill, 1949. 522p.

COELHO, A. S. R.; MELLO, H. A.; SIMÕES, J. M. Comportamento de espécies de eucalipto face ao espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, n. 1, p. 29-55, 1970.

COUTO, L. **Influência do espaçamento no crescimento do *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida, cultivado na região de Coronel Fabriciano, Minas Gerais.** 1977. 45f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG 1977.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D.; DIAS, A. N. FILHO, A.A. T.; FONSECA, E.M.B.; CORRÊA, M. R. **Espaçamentos de plantio de espécies de rápido crescimento para dendroenergia.** Belo Horizonte, MG: Companhia Energética de Minas Gerais, 2002. 66p.

DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHIERI, H. R. **Produção e rentabilidade do eucalipto em empresas florestais.** Colombo: EMBRAPA, 2002. 4p.

ERIKÄINEN K. Stem volume models with random coefficients for *Pinus kesyia* in Tanzania, Zambia and Zimbabwe. **Can. J. For. Res.** v. 31, p. 879-888, 2001.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de biometria florestal.** Santa Maria:UFSM, CEPEF - FATEC, 1992. 269p.

FINGER, C.A.G., ZANON, M.L.B., SCHNEIDER, P.R. et al. 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.

FRIEDL, R.A. **Dinâmica de forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 1989. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1989.

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.

GORGULHO, E.P.; RAMALHO, M.P.; SOARES, A.R. Avaliação de progênies de *Eucalyptus pyrocarpa* L. Johnson e Blaxel, em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Árvore**, v. 15, n. 3, p. 207-216, 1991.

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. L.; BEERS, T. E. **Forest mensuration**. 3. ed. New York: J. Willey e Sons, 1982. 397p.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3. ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993. 402p.

INFORME AGROPECUÁRIO, EPAMIG, Belo Horizonte, v.29, n.242, jan/fev. 2008.

KILKKI P. Sample trees in timber volume estimation. **Acta Forestalia Fennica**. v.182, p.1-31. 1983.

KRAMER, H. **Waldwachstumslehre**. Hamburg: Paul Parey, 1988. 374p.

KRUSCHEWSKY, G. C.; MACEDO, R. L G.; VENTURIN, N.; OLIVEIRA, T. K. Arranjo estrutural e dinâmica de crescimento de *Eucalyptus* spp. em sistema agrossilvipastoril no cerrado. **Revista Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 360-367, 2007.

LADEIRA, B. C. **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp., sob três diferentes espaçamentos, em uma sequencia de idades**. 1999. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

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.

LARSON, P. R. Stern from development of forest tree. **Forest Science Monograph**. Washington, p. 1-41, 1963.

LIMA, F. **Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 1986.

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

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Relações hídricas e crescimento de árvores de *E. camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 41-50, 1998.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory Bern, Verlagsgesellschaft München**, 1973. v. 2. 469p.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba. 2003. 309p.

MARQUEZ, C. E. C. **Estudo silvicultural e econômico de povoamentos de eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais**. 1997. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

MELLO, H. A.; MASCARENHAS SOBRINHO, J.; SIMÕES, J. W.; DO COUTO, H. T. Z. Influência do espaçamento e da idade de corte na produção de madeira de eucalipto em solo de cerrado. **IPEF**, Piracicaba, v. 13, p. 143-162, 1976.

MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. 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. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 355-368, abr./jun. 2011.

MÜLLER, I. **Forma de tronco e sortimentos de madeira para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., manejado em alto fuste, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul**. 2004. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MÜLLER, M. D.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e balanço nutricional de plantações de eucalipto clonal em diferentes densidades de plantio no município de Itamarandiba-MG. **Revista Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 91-101, 2005a.

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

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.

OLIVEIRA T. K. **Sistemas Agrossilvipastoril com eucalipto e branquiária sob diferentes arranjos estruturais em área de Cerrado**. Lavras. 2005. 150f. (Tese – Doutorado). Universidade Federal de Lavras - UFLA, 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.

OLIVEIRA NETO, S. N.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; NEVES, J. C. L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **Rev. Floresta**, Curitiba, PR, v. 40, n. 4, p. 755-762, 2010.

PALHA LEITE, F.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M. A.; FABRES, A. S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 313-321, 1997.

PAULINO, E. J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantio de eucalipto.** 2012. 59f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – UFVJM. Diamantina, 2012.

PATIÑO-VALERA, F. **Variación 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.

PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p. 2839-2851, 2011.

PIRES, L. M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 5, p. 845-852, 2007.

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.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia.** 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2011.

ROW, C.; GUTTENBERG, S. Determining weight-volume relationship for saw logs. **For Prod. Journ.**, v. 16, n. 5, p. 39-47. 1966.

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

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

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

SCHNEIDER, P. R.; FINGER C. A. G.; HOPPE J.M.; DRESCHER R.; SCHEEREN L.W.; MAINARDI, G. Produção de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em diferentes intensidades de desbaste. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 129-140, 1998.

SCOLFORO, J.R.S. **Manejo Florestal.** Universidade Federal de Lavras. FAPE. Lavras, 1997, 433p.

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

SILVA, J.A. **Seleção de parcelas amostrais aplicadas em povoamentos de *Pinus taeda* L. para fins biométricos em Santa Maria - RS.** 1974. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural) - Universidade Federal de Santa Maria, 1974.

SIMÕES, J. W.; BRANDI, R. M.; MALINOVSKY, J. R. **Formação de florestas com espécies de rápido crescimento.** (Série divulgação PNUD/FAO/IBDF/BRA-45,6). Brasília: IBDF/PNUD/FAO, 1976. 74p.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. 1-22, 1989.

SMITH, W. D.; STRUB, M. R. Initial spacing: how many trees to plant. In: DURYEY, M. L.; DOUGHERTY, P. M. (Ed.) **Forest regeneration manual.** Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 281-289, 1991.

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L. Avaliação de modelos de afilamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.3, p.453-463, 2008a.

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. R.; MENDONÇA, J. F.; ALMEIDA, A. Q. Avaliação de modelos de afilamento não segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **Revista Ciência Florestal**, UFSM-Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 393-405, 2008b.

SPURR, S. H. **Forest Inventory.** New York: The Ronald Press Company, 1952. 476p.

STAPE, J. L. **Utilização de delineamento sistemático tipo “leque” no estudo de espaçamentos florestais.** 1995. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

STAPE, J.L.; BALLONI, E.A.; ZANI FILHO, J. Planejamento técnico em plantios florestais na Ripasa. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 18, p. 1-43, 1988.

STERBA, H. **Vorlesungsunterlagen zur Forstlichen Ertragslehre.** Wen Univ. F. Bodenkultur. 1988. 150p. (unpublished).

TASSISA G., BURKHART H.E. An application of mixed effects analysis to modeling Thinning effects on stem profile of loblolly pine. **For. Ecol. Manage.** v. 103, p. 87-101, 1998.

CAPÍTULO I

FORMA DE FUSTE DE ÁRVORES DE EUCALIPTO EM PLANTIOS ADENSADOS

RESUMO - O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do arranjo espacial de plantio na forma do fuste de árvores de eucalipto. Foram utilizados dados de um experimento implantado em dezembro de 2002, no delineamento em blocos (três blocos), sendo testados os arranjos espaciais de 3,0 x 0,5; 3,0 x 1,0; 3,0 x 1,5; 3,0 x 2,0 e 3,0 x 3,0 m. Aos oito anos de idade foram abatidas e cubadas um total de 180 árvores. Esses dados foram utilizados para ajustar os modelos de Kozak, Schöepfer, Garay, Demaerschalk e Ormerod. Os modelos selecionados foram de Garay e de Shöepfer. A escolha foi feita com base nas estatísticas, coeficiente de correlação, erro-padrão residual, *bias* e da análise gráfica dos resíduos. Testes de identidade de modelos foram aplicados nos modelos selecionados com a finalidade de verificar a igualdade entre a forma dos fustes. Foram selecionados e agrupados entre os diferentes arranjos espaciais, fustes que apresentassem valores iguais ou bem próximos do *dap*, da altura total e do primeiro diâmetro aferido na base, constituindo grupos. Em seguida, ajustou-se para cada um destes fustes a equação geral das curvas, obtendo um valor de expoente de forma para cada. O expoente foi calculado com a finalidade em verificar a variação da forma média dos fustes em função da variação do arranjo inicial de plantio. O modelo de Garay é o mais indicado para descrever o *taper* de eucaliptos nos arranjos espaciais avaliados. Foi aceita a hipótese de nulidade no teste de identidade de modelos não linear, indicando a igualdade entre as equações nos arranjos de 3,0 x 0,5 e 3,0 x 1,0 m. Para uma distância de 3 metros entre fileiras, quanto maior a distância entre plantas, mais cônica é a forma do fuste.

Palavras chave: *Taper*; Espaçamento; Identidade de modelos.

1. INTRODUÇÃO

A forma do fuste ou seu afilamento é definida pela taxa de decréscimo do diâmetro (d), em relação ao dap , ao longo do tronco. O seu conhecimento é de fundamental importância em inventários florestais para multiprodutos (HUSCH et al., 2003). Ela pode variar com a espécie ou material genético, com o espaçamento inicial e com a prática de desbastes, além da capacidade produtiva do local (CAMPOS e LEITE, 2013) e o seu estudo é feito com o emprego de modelos de afilamento.

Os modelos de *taper* ou de afilamento são relações funcionais e constituem uma importante ferramenta estatística de uso corrente na determinação dos perfis dos fustes (PRODAN, 1968; HUSCH et al., 1993). Esses modelos servem para estimar três características básicas, o diâmetro (d) em uma altura (h) qualquer, para estimar a altura (h) onde ocorre um diâmetro (d) qualquer e o volume (V) entre duas alturas comerciais quaisquer (h_1 e h_2) e estudar a forma do fuste da árvore ao longo de sua vida (KOZAK et al., 1969).

A variável dependente de uma função de *taper* é a razão entre o diâmetro (d) a uma altura conhecida (h) e o diâmetro com casca a 1,30 metros (dap). Diversos modelos de *taper* têm sido propostos e empregados para exprimir o perfil do fuste, contemplando as variações de forma (CAMPOS e LEITE, 2013). Os modelos mais difundidos são os de Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972) e Garay (1979).

Segundo Lima (1986), Campos e Leite (2013), a maioria dos modelos de *taper* não descreve todo o fuste com a mesma precisão. O melhor modelo depende dos objetivos; ou seja, enquanto um determinado modelo tem melhor desempenho para estimar d , ele pode não ser o melhor para estimar h e V . Na prática, se um modelo estima d com exatidão, para qualquer h , não é necessário avaliá-lo em relação às estimativas de h e V . Conforme Campos e Leite (2013), uma razão para um modelo ser eficiente para estimar d e não para estimar h é que a esta variável não faz parte da variável dependente, para o qual se aplica o procedimento de ajuste (a minimização de erros).

O arranjo inicial de plantio pode influenciar de modo significativo o crescimento das árvores e a forma de seus fustes (SCHÖNAU e COETZEE, 1989; GERRAND et al., 1997; NEILSEN e GERRAND, 1999). Em muitos casos, para um mesmo tipo de manejo e idade, o fator de forma tende a aumentar à medida que se tem maior número de árvores por hectare no plantio (LARSON, 1963; ASSMANN 1970; HAMILTON e CHRISTIE, 1974, BALLONI 1983 e OPIE et al., 1984, citados por SCHONAU e COETZEE, 1989; FRIEDL 1989;

KRAMER 1988; STERBA 1988; BALDWIN et al., 2000; NOGUEIRA et al. 2008; RANCE et al., 2012).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do arranjo espacial de plantio na forma do fuste de árvores de eucalipto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de um experimento implantado em dezembro de 2002, em Itamarandiba-MG. O material genético utilizado foi um clone de um híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*. O delineamento experimental foi estabelecido em blocos ao acaso (três blocos), sendo testados cinco tratamentos, arranjos espaciais de 3,0 x 0,5 m; 3,0 x 1,0 m; 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m, denominados respectivamente de T1, T2, T3, T4 e T5. Cada parcela experimental foi constituída de seis linhas de plantio, cada uma com 28 covas, perfazendo um total de 168 árvores por tratamento e repetição.

Aos oito anos de idade foram abatidas 180 árvores (Tabela 1). Em cada árvore abatida foram medidas além do *dap* e da altura total (*Ht*), os diâmetros com e sem casca nas seguintes alturas (*h*): 0,10; 0,30; 0,70; 1,00; 1,30 e 2,00 m, e a partir deste ponto em intervalos de 1,0 em 1,0 m, até a altura *h* onde $d = 2,0$ cm aproximadamente.

Tabela 1: Distribuição de frequência das árvores abatidas para cubagem em povoamentos de eucaliptos com diferentes arranjos espaciais, em Itamarandiba-MG, 2002

Tratamentos	Arranjo Espacial	Centro de Classe (cm)			Total
		7,0	12,0	17,0	
1	3,0 x 0,5	21	15	-	36
2	3,0 x 1,0	14	21	1	36
3	3,0 x 1,5	8	21	7	36
4	3,0 x 2,0	4	23	9	36
5	3,0 x 3,0	-	15	21	36
Total		47	94	39	180

Esses dados foram utilizados para ajustar os modelos apresentados a seguir.

a) Modelo de Kozak *et al.* (1969):

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right)^2 + \varepsilon \quad (1)$$

b) Modelo de Schöpfer (1966):

$$\frac{d}{dap} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{Ht}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{Ht}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h}{Ht}\right)^5 + \varepsilon \quad (2)$$

c) Modelo de Garay (1979):

$$\frac{d}{dap} = \beta_0(1 + \beta_1 \text{Ln}(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (3)$$

d) Modelo de Demaerschalk (1972):

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = 10^{2\beta_0} dap^{(2\beta_1-2)} Ht^{2\beta_2} (Ht - h)^{2\beta_3} + \varepsilon \quad (4)$$

e) Modelo de Ormerod (1973):

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \left(\frac{Ht-h}{Ht-1,30}\right)^{2\beta_1} + \varepsilon \quad (5)$$

em que:

d = diâmetro com casca na altura h (cm);

dap = diâmetro com casca (cm), a 1,30 m de altura;

h = altura comercial (m);

Ht = altura total (m);

β_k = parâmetros ($k = 0, 1, \dots, 5$); e

ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$.

A qualidade dos ajustes foi avaliada individualmente por meio das estatísticas, coeficiente de correlação ($r_{\hat{Y}Y}$), erro-padrão residual ($S_{yx}\%$), *Bias* e análise gráfica dos resíduos, descritas a seguir, conforme Campos e Leite (2013). Considerou-se o modelo mais acurado, aquele que apresentou os melhores resultados para o conjunto das estatísticas mencionadas acima. Para a escolha em questão, torna-se indispensável à análise gráfica dos resíduos, pois ela permite a avaliação de tendências nas estimativas além de detectar se os resíduos são independentes e se há homogeneidade na variância (BARROS et al., 2002; MIGUEL et al., 2010).

$$\bullet \quad r_{\hat{Y}Y} = \frac{n^{-1}(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{(n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2)(n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}, \quad \hat{Y}_m = n^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i; \quad (6)$$

$$\bullet \quad S_{xy} (\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{QMres}; \quad (7)$$

$$\bullet \quad Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}; \quad (8)$$

$$\bullet \quad Resíduo(\%) = \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)}{Y_i} \times 100; \quad (9)$$

em que:

Y_i = valores observados de d/dap ou $(d/dap)^2$;

\hat{Y}_i = valores estimados de d/dap ou $(d/dap)^2$;

\bar{Y} = média dos valores observados de d/dap ou $(d/dap)^2$;

\hat{Y}_m = média das estimativas de d/dap ou $(d/dap)^2$;

$QMres$ = Quadrado médio do resíduo da regressão;

n = número de observações; e

p = número de parâmetros do modelo.

3.1 Utilização da equação geral das curvas para estimar a forma média dos fustes

Utilizando a expressão $y = bx^r$, para modelar o perfil dos fustes, e assumindo a rotação da curva gerada em torno de seu próprio eixo são definidos os sólidos geométricos ou sólidos de revolução, ou ainda, segundo Finger (1992) os “protótipos dendrométricos”. As formas obtidas são comparáveis à forma do fuste ou a partes deste. Onde, o expoente dessa equação, tem por finalidade alterar a forma da curva obtida. Então, o sólido geométrico obtido a partir de um determinado fuste pode ser uma alternativa para verificar a variação na sua forma média.

Segundo Lehmann (1987), a constante arbitrária ou parâmetro r representa uma família de curvas denominadas curvas de potência, que são do tipo parabólico se r é positivo, e do tipo hiperbólico se r é negativo. Considerando as curvas do tipo parabólicas analogamente às formas geométricas que um fuste pode assumir, os sólidos geométricos podem ser classificados: para $r=0$, um cilindro é obtido, $r = \frac{1}{2}$, um parabolóide; $r=1$, um cone; e para $r = \frac{3}{2}$, um neilóide é obtido (HUSCH et al., 2003; CAMPOS e LEITE, 2013).

Equação geral das curvas:

$$y = bx^r \quad , b \neq 0 \quad (10)$$

Onde: y representa o raio da seção transversal em centímetros, neste caso, os diâmetros das seções medidas na cubagem dividido por dois ($d^{cc}/2$); b é um parâmetro, que determina o afunilamento de uma forma específica; x corresponde ao eixo do sólido, dado entre a distância em metros entre o topo do fuste e a posição (h) da seção transversal (y), sendo $x = (Ht-h)$, e r determina a maneira que o perfil se estreita.

Foram selecionados e agrupados entre os diferentes arranjos espaciais, fustes que apresentassem valores iguais ou bem próximos do *dap*, da altura total e do primeiro diâmetro aferido na base ($h= 0,10$ m), constituindo grupos. Nos casos de fustes com alturas diferentes em um mesmo grupo, foi definido um mesmo valor de h no topo para todos correspondente ao valor da altura da última seção do menor fuste. Obtendo para um mesmo grupo, fustes com número de seções e alturas iguais. Finalmente foi ajustada para cada fuste a equação geral das curvas (10), e a partir do valor de cada expoente r obtido, buscou-se verificar a diferença entre a forma média dos fustes.

3.2 Testes de Identidade de Modelos

As equações de afilamento ajustadas a partir do modelo não linear que melhor se ajustou aos dados foram comparadas empregando o teste de identidade de modelos, conforme Regazzi e Silva (2010). A hipótese avaliada foi $H_0: \hat{\beta}_{ij} = \hat{\beta}_{ij'}$, vs. H_a : não H_0 , sendo $\hat{\beta}_{ij}$ e $\hat{\beta}_{ij'}$ os vetores de estimativas dos povoamentos para os tratamentos j e j' . A estatística utilizada foi $F_{(H_0)} = \frac{(SQRR(\omega) - SQRR(\Omega))/[t(H-1)]}{SQRR(\Omega)/[N - Hp - H(r-1)]}$; com distribuição $F\{t(H-1); [N - Hp - H(r-1)]\}$, graus de liberdade. Em que: $SQRR(\Omega)_{DBC} = \sum_{h=1}^H SQRR_{h(DBC)}$.

Da mesma maneira, as equações de afilamento ajustadas a partir do modelo linear que melhor se ajustou ao conjunto de dados foram comparadas empregando o teste de identidade de modelos, conforme Regazzi (1999). Foi avaliada a mesma hipótese definida anteriormente para o teste não linear. A estatística utilizada foi $F_{(H_0)} = \frac{(SQPR(\Omega) - SQPR(\omega))/[p(H-1)]}{SQRR(\Omega) - \sum SQBlocos/[N - Hp - H(r-1)]}$; com distribuição $F\{p(H-1); [N - Hp - H(r-1)]\}$, graus de liberdade. Em que: $SQRR_h(\Omega) = SQTotal_h(\Omega) - SQPR_h(\Omega) - SQBlocos_h(\Omega)$.

Considerem-se as definições a seguir:

$SQBlocos_h$ = soma de quadrados de blocos para o h-ésimo grupo;
 $SQTotal_h$ = soma de quadrados total da regressão para o h-ésimo grupo;
 $SQPR_h$ = soma de quadrados de parâmetros da regressão para o h-ésimo grupo;
 $SQRR_h$ = soma de quadrados do resíduo da regressão para o h-ésimo grupo, para o delineamento em blocos completos casualizados;
 $SQRR_h (DBC)$ = soma de quadrados do resíduo da regressão (falta de ajustamento mais o resíduo) para o h-ésimo grupo, para o delineamento em blocos completos casualizados;
 Ω = espaço paramétrico para o modelo completo;
 ω = espaço paramétrico para o modelo reduzido sob H_0 ;
 t = número de parâmetros a serem testados (dependente da hipótese);
 N = número total de observações;
 H = número de equações serem testadas;
 p = número de parâmetros da regressão; e
 r = número de repetições dentro dos blocos.

A condição estabelecida para identidade de modelos é: rejeita-se H_0 se e somente se $F_{H_0} \geq F_{\alpha:(GL)}$, considerando uma probabilidade $\alpha = 1 \%$, sendo GL o respectivo número de graus de liberdade.

Neste estudo os ajustes dos modelos lineares foram feitos a partir do método dos mínimos quadrados ordinários e os ajustes dos modelos não lineares pelo método iterativo Gauss-Newton, ambos no *Software* Estatística 10.0 (STATSOFT, 2010).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estimativas dos parâmetros e as estatísticas $r_{\hat{Y}}$, S_{xy} e *Bias* obtidos nos ajustes dos modelos de *taper*, para cada tratamento, para as variáveis d/dap e $(d/dap)^2$, são apresentadas na Tabela 2. As equações referentes aos modelos, linear de Schöepfer e não linear de Garay apresentaram os menores valores das estatísticas $r_{\hat{Y}}$, $S_{xy}\%$ e *Bias* dos ajustes referentes a todos os tratamentos. Estas estatísticas não retratam o desempenho das funções de afilamento ao longo do fuste, tratam-se apenas, das médias das variações das estimativas totais. Logo, servem apenas como um indicativo da qualidade do ajuste. Por isso, é necessário analisar graficamente os resíduos e, também, validar os modelos em relação, principalmente, à variável d .

Tabela 2: Estimativas dos parâmetros dos modelos de *taper* estimados em cada tratamento e respectivas estatísticas empregadas para avaliar a qualidade dos ajustamentos

Modelos	Par./Est.	Tratamentos				
		T1	T2	T3	T4	T5
Kozak (1969)	β_0	1,21294170**	1,19531249**	1,21039136**	1,20842225**	1,19647158**
	β_1	-2,12458607**	-2,06996732**	-2,12893534**	-2,07611850**	-2,08907603**
	β_2	0,98664542**	0,93520660**	0,99111125**	0,93585968**	0,96018481**
	$r_{\hat{y}y}$	0,9783	0,9792	0,9776	0,9778	0,9764
	$S_{xy}(\%)$	13,1866	13,1836	13,8450	13,6681	14,0043
	<i>Bias</i>	-2,72791 x10 ⁻¹⁶	1,11 x10 ⁻⁴	-8,78077 x10 ⁻¹⁶	-1,38135 x10 ⁻¹⁵	5,83484 x10 ⁻¹⁶
Schöepfer (1966)	β_0	1,16856154**	1,16220721**	1,17568270**	1,17664787**	1,16763760**
	β_1	-3,02245212**	-3,10010246**	-3,32502792**	-3,23011997**	-3,27135930**
	β_2	13,17118389**	13,75209369**	14,77412849**	14,02468618**	14,22874988**
	β_3	-32,89754500**	-34,24138607**	-36,14636445**	-33,89100299**	-33,96062159**
	β_4	36,21564865**	37,54061784**	39,21377461**	36,48416905**	35,94747372**
	β_5	-14,61623940**	-15,11999763**	-15,71313837**	-14,57199120**	-14,11411271**
	$r_{\hat{y}y}$	0,9907	0,9920	0,9925	0,9928	0,9924
	$S_{xy}(\%)$	4,8313	4,6336	4,4830	4,3728	4,4457
<i>Bias</i>	-9,83 x10 ⁻¹⁶	-2,64 x10 ⁻¹⁵	2,67 x10 ⁻¹⁵	-6,43 x10 ⁻¹⁵	-5,93 x10 ⁻¹⁵	
Garay (1979)	β_0	1,23934531	1,26818618	1,33183522	1,34581800	1,33236942
	β_1	0,35907258	0,29893995	0,26238211	0,24944384	0,25335241
	β_2	0,92016386	0,95765930	0,97379746	0,97870360	0,97882586
	β_3	0,31961824	0,24646873	0,17970019	0,16503318	0,16965867
	$r_{\hat{y}y}$	0,9916	0,9930	0,9946	0,9941	0,9945
	$S_{xy}(\%)$	4,8482	4,6843	4,4746	4,3187	4,4492
<i>Bias</i>	-4,63 x10 ⁻⁹	-1,21 x10 ⁻⁹	1,36 x10 ⁻⁸	1,21 x10 ⁻⁸	3,09 x10 ⁻⁹	
Demaer- schalk (1972)	β_0	0,08851461	0,18095622	0,04635788	0,03175248	-0,08058943
	β_1	1,01948954	1,05795049	0,95000719	0,95940595	0,87662945
	β_2	-0,82882025	-0,92565031	-0,74440316	-0,71954439	-0,59207568
	β_3	0,77487394	0,77186628	0,77741180	0,75534108	0,77408990
	$r_{\hat{y}y}$	0,9762	0,9786	0,9751	0,9750	0,9742
	$S_{xy}(\%)$	13,9444	13,5197	14,7352	14,6086	14,7373
<i>Bias</i>	6,88 x10 ⁻³	6,67 x10 ⁻³	7,55 x10 ⁻³	7,169 x10 ⁻³	6,78 x10 ⁻³	
Ormerod (1973)	β_1	1,09673652	1,10882753	1,13680932	1,14616140	1,14289363
	$r_{\hat{y}y}$	0,9722 (5)	0,9745	0,9718	0,9698	0,9701
	$S_{xy}(\%)$	17,5175	17,2118	18,0597	18,7726	18,2335
	<i>Bias</i>	4,15 x10 ⁻²	4,03 x10 ⁻²	4,10 x10 ⁻²	4,48 x10 ⁻²	4,02 x10 ⁻²

Onde: ** = parâmetro significativo a 1% de probabilidade; β_k = parâmetros do referido modelo; $r_{\hat{y}y}$ = coeficientes de correlação; $S_{xy}(\%)$ = erro-padrão da estimativa em percentagem.

Avaliando a distribuição dos resíduos nos ajustes dos modelos que melhor se ajustaram aos dados, Garay e de Shöepfer, na Figura 1, podem ser observados a distribuição e o comportamento dos resíduos ao longo dos fustes, onde os pontos distribuem-se uniformemente indicando boa precisão entre os valores observados e estimados, concentrando-se em sua maioria entre $\pm 10\%$, em todos os tratamentos. Em todos os tratamentos houve uma maior dispersão dos resíduos localizados na região mais próxima à base dos fustes (Figura 1), de acordo com Souza et al. (2008), isso ocorre devido ser na porção da base da árvore onde há uma maior deformação na forma do fuste. Trata-se da

região no fuste onde o afilamento é mais acentuado, ocorrendo uma variação mais brusca no diâmetro. Ambos os modelos geraram estimativas bem próximas, livres de tendências e com os erros apresentando distribuição normal (Figura 1).

Embora, os demais modelos tenham apresentado estatísticas satisfatórias para a maioria dos ajustes, como observado na Tabela 1. Com exceção do modelo de Kozak, os modelos de Demaerschalk e Ormerod, apresentaram tendências acentuadas de superestimação e ou subestimação em todos os tratamentos, observado a partir da dispersão dos resíduos (Figuras 1A, 2A e 3A).

O modelo de Garay foi o que melhor se ajustou aos dados, obtendo uma dispersão dos resíduos mais uniforme e agrupada (Figura 1), quando comparado aos ajustes do modelo de Schöpfer, que apresentou alguns valores mais dispersos na região do topo dos fustes (Figura 1), entretanto, foi o modelo linear que melhor se ajustou aos dados.

O modelo de Garay apresenta tendências comprovadas e fidedignas à realidade biológica para predição da forma dos fustes. Segundo Leite et al. (2006), este modelo é flexível o suficiente para descrever as variações de forma em árvores de diferentes espécies e tamanhos e consistente em relação às variáveis de diâmetro comercial, altura comercial e volume. O modelo de Schöpfer trata-se de um polinômio de grau elevado, capaz de descrever curvas com as mais variadas formas. No entanto, muitas vezes suas estimativas não apresentam uma tendência lógica quando avaliada do ponto de vista biológico. Horle et al. (2010), avaliando os ajustes de um modelo não linear (modelo logístico modificado) e do polinômio de Schöpfer (1966), em árvores de *Pinus oocarpa*, concluíram, que o modelo não linear foi o mais indicado por apresentar uma boa estabilidade, dentro e fora da faixa de variação dos dados coletados, e retratar as leis biológicas de crescimento.

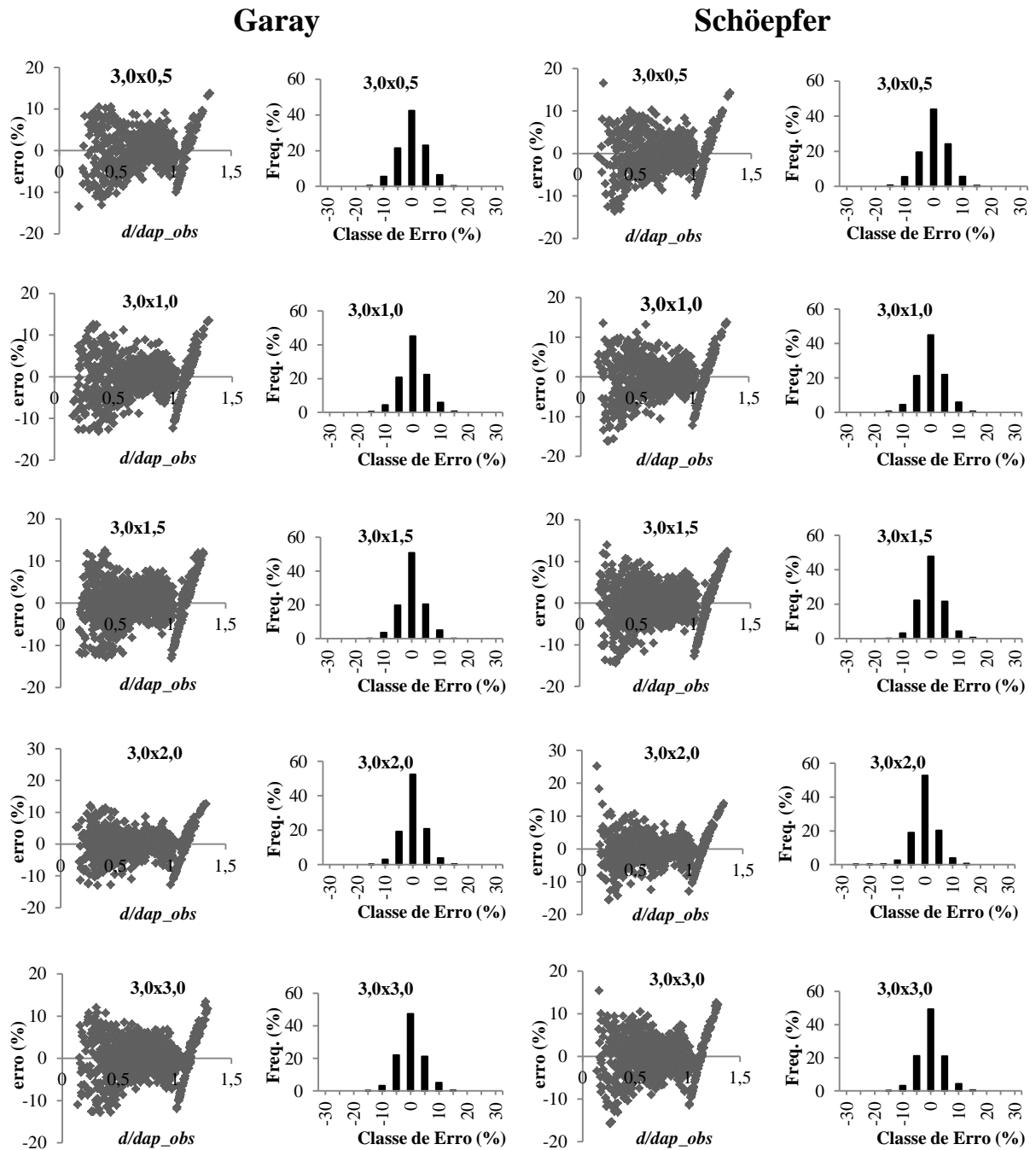


Figura 1: Valores de d/dap observados em função de seus correspondentes valores de erros estimados em porcentagem, e, frequência percentual dos resíduos percentuais de d/dap estimados, referentes aos ajustes dos modelos de Garay (1969) e de Schöpfer (1966), em árvores de eucalipto em Itamarandiba-MG.

4.1 Utilização da equação geral das curvas para estimar a forma média dos fustes

Na Tabela 3, são apresentadas as características dendrométricas dos fustes utilizados nos ajustes da equação geral das curvas e seus respectivos valores de coeficientes de forma r , onde foram definidos quatro grupos distintos.

No grupo 1, referente às árvores com menor *dap*, o valor de r foi igual a 0,6858, para o fuste do tratamento T1, aumentando para 0,7548 e 0,8028 para os fustes referentes aos tratamentos T2 e T3, respectivamente (Tabela 3). De acordo com os valores encontrados, os fustes de T1, assumem formas mais próximas de um parabolóide, e os fustes referentes à T2 e T3, assumem formas mais próximas de um cone.

No grupo 2, foi avaliado o comportamento do expoente r contemplando os fustes de todos os tratamentos. O mesmo comportamento com aumento gradual de r foi observado do tratamento T1 para T5, de 0,6337 a 0,744, respectivamente (Tabela 3). Apresentando valores de r crescentes, porém muito próximos entre T2, T3 e T4. Provavelmente devido à pequena diferença de área útil por planta entre os tratamentos, tal similaridade entre estes perfis podem ser observados na Figura 2. Avaliando somente os fustes dos tratamentos T1 e T5, o fuste do tratamento T1, apresenta um valor de r muito próximo da forma de um parabolóide perfeito ($r=0,6337$), enquanto o fuste referente à T5 tende mais para a forma de um cone ($r=0,7447$). Os fustes referentes aos demais tratamentos apresentam formas intermediárias às apresentadas pelos fustes de T1 e T5, sendo consideradas como parabolóides (Tabela 3).

Os valores referentes ao grupo 3, também apresentaram a mesma tendência crescente para o valor do expoente r , apresentando intervalo entre o menor e o maior valor de r ainda menor que o apresentado no grupo 2. Os fustes referentes aos tratamentos T2 e T3 apresentaram a forma mais próxima de um parabolóide perfeito, enquanto os fustes de T4 e T5 tenderam a formas mais cônicas, observado com o aumento do valor de r (Tabela 3).

Para os valores de r do grupo 4, referentes às árvores de maior *dap*, o valor de r referente ao fuste do tratamento T4, foi inferior ao valor do fuste do tratamento T3, 0,6528 e 0,6500, respectivamente. O valor do expoente r referente ao fuste do tratamento T5 foi superior aos valores dos fustes de T3 e T4, como ocorreu nos grupos 2 e 3 (Tabela 3). Os fustes referentes à T3 e T4, tenderam mais uma vez para um padrão de forma mais parabólico, enquanto T5, para uma forma mais cônica.

Os valores dos expoentes r são diferentes, quando comparados para árvores do mesmo espaçamento em diferentes grupos (Tabela 4), isso ocorre devido à diferença entre os diâmetros e entre os comprimentos dos fustes, e também devido ao fato que árvores provenientes de um mesmo povoamento possam vir a apresentar formas distintas, corroborando com afirmação de Kilkki (1983), Tassisa e Burkhart (1998), e Eerikäinen (2001).

Tabela 3: Valores dos coeficientes de forma r , calculados para árvores de eucalipto com dap e alturas semelhantes entre os diferentes arranjos espaciais, em Itamarandiba-MG

Grupos	Tratamentos	Arranjo espacial (m)	dap (cm)	Ht (m)	dcc_1 (cm) ($hi = 0,10$ m)	dcc_i (cm)	hi (m)	r
1	T1	3,0 x 0,5	7,8	15,5	9,2	2,2	14,0	0,6858
	T2	3,0 x 1,0	7,4	16,4	9,3	2,4	14,0	0,7548
	T3	3,0 x 1,5	7,4	15,4	9,2	1,6	14,0	0,8028
2	T1	3,0 x 0,5	11,7	23,4	13,6	3,3	21,0	0,6337
	T2	3,0 x 1,0	11,9	24,7	13,9	3,9	21,0	0,6774
	T3	3,0 x 1,5	11,8	24,6	14,4	3,7	21,0	0,6962
	T4	3,0 x 2,0	11,7	23,9	15,0	3,2	21,0	0,6988
	T5	3,0 x 3,0	12,0	23,6	14,3	2,8	21,0	0,7447
3	T2	3,0 x 1,0	14,6	27,3	17,5	4,2	24,0	0,6452
	T3	3,0 x 1,5	14,3	26,8	18,3	3,7	24,0	0,6535
	T4	3,0 x 2,0	14,2	27,3	18,2	4,3	24,0	0,6787
	T5	3,0 x 3,0	14,2	26,8	18,0	3,9	24,0	0,6831
4	T3	3,0 x 1,5	17,4	29,0	20,0	3,4	26,0	0,6528
	T4	3,0 x 2,0	17,5	28,8	20,2	4,0	26,0	0,6500
	T5	3,0 x 3,0	17,3	29,0	21,5	3,4	26,0	0,7089

Onde: dap = valores dos diâmetros à altura do peito de cada árvore; Ht = altura total; dcc_1 = referente ao primeiro diâmetro com casca aferido na base do fuste; dcc_i = referente ao último diâmetro considerado no topo dos fustes e hi = referente à altura do último diâmetro considerado no topo.

Müller (2004) estudou o expoente de forma em árvores de *Eucalyptus grandis* no Rio Grande do Sul, implantadas no espaçamento 3,0 x 2,0 metros e que sofreram desbastes, restando aproximadamente 200 árvores por hectare, encontrou para vinte e seis árvores com o dap inferior a 20 cm, expoente de forma igual a 1,277, classificando a forma média destes fustes entre um parabolóide e um cone. O autor, ainda concluiu que, mesmo para árvores com dap superiores a 30 cm, a forma média dos fustes foi à mesma. A classificação de forma média dos fustes relatada pelo referido autor corroboram com a encontrada no presente estudo, e com a afirmação de Husch et al., (2003), que os fustes das árvores raramente são exatamente cones, parabolóides, ou neilóides. Em geral, ficam entre as formas de cone e parabolóide.

A partir das comparações entre os valores apresentados na Tabela 4, pode-se afirmar que, para árvores com fustes de dimensões semelhantes, conduzidas em diferentes espaçamentos, o valor do expoente r aumenta à medida que a área útil por indivíduo aumenta. Baseado nas classificações de Lehmann (1987) e Husch et al. (2003), quanto mais próximo de zero, mais a curva que r representa se aproxima da forma de um cilindro, e quanto mais próximo de um, mais se aproxima da forma de um cone (Figura 2). Estes resultados confirmam de uma maneira diferente a relação entre a forma do fuste e o espaçamento, já

relatada por diversos autores. Conforme Assmann (1970), Kramer (1988), Sterba (1988), Baldwin et al. (2000), Nogueira et al. (2008), Pinkard e Neilsen (2003), Rance et al. (2012), é esperado que, árvores conduzidas em menores espaçamentos, apresentem fustes mais cilíndricos, em comparação com árvores conduzidas em espaçamentos mais amplos.

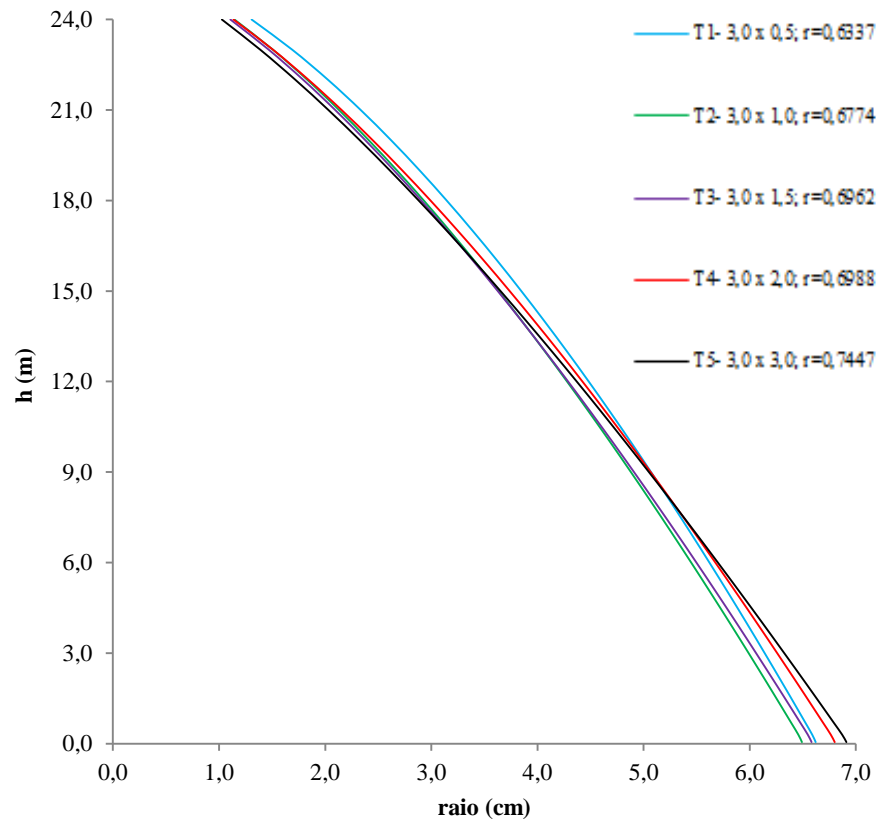


Figura 2: Perfis referentes à árvore de diâmetro médio ($dap=12,5$ cm; $Ht=25$ m), estimados a partir da equação geral das curvas utilizando os valores do expoente r obtidos nos ajustes dos fustes no grupo 2, em árvores de eucalipto em Itamarandiba-MG.

4.2 Teste de identidade de modelos

O teste de identidade de modelos não linear foi aplicado no modelo de Garay e o teste de identidade linear no modelo de Schöepfer, por terem sido os modelos que melhor se ajustaram ao conjunto de dados. A aplicação dos testes teve como propósito verificar se a forma (ou *taper*) dos fustes das árvores é coincidente para dois ou mais tratamentos. Os testes não linear e linear foram realizados para o conjunto total de dados $n = 4449$, pares de dados, rejeitou-se H_0 para $\alpha = 1\%$, concluindo que pelo menos uma equação difere das demais, logo, um modelo comum (ω_i) não pôde ser utilizado para o conjunto total de dados. Partiu-se então,

para os testes aos pares de tratamentos para definição de quais os perfis diferem entre si (Tabela 4).

Nas combinações avaliadas entre os pares de tratamentos nos testes não linear e linear, foi aceita a hipótese de nulidade H_0 , somente entre os tratamentos T1 e T2, para o teste não linear (Tabela 4), indicando a igualdade entre as equações, portanto, a forma ou o *taper* dos fustes nestes tratamentos são iguais estatisticamente. A Figura 3, ilustra o *taper* da árvore média estimada pelas equações dos modelos de Garay e de Shöepfer conforme o resultado dos respectivos testes de identidade de modelos.

Os perfis descritos pelo modelo de Shöepfer apresentam uma sinuosidade mais acentuada, quando comparados aos perfis descritos pelo modelo de Garay (Figura 3), provavelmente, pelo fato de se tratar de um polinômio de grau elevado e muito flexível.

O modelo de Shöepfer (1966), apresentou dificuldade em captar as diferenças nas formas dos fustes, não estimando com precisão. Portanto, a sua utilização com o objetivo em avaliar a forma não é adequada, entretanto, tal limitação não deve ser levada em consideração para as demais funções atribuídas ao referido modelo de afilamento sem serem avaliadas.

Segundo Lima (1986), Campos e Leite (2013), a maioria dos modelos de *taper* não descreve todo o fuste com a mesma precisão. Exatamente na porção do topo, onde os fustes tendem a apresentar as maiores diferenças quando submetidos a espaçamentos muito reduzidos. 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 Hamilton e Christie (1974) citado por Schonau e Coetzee (1989), devido ao aumento da densidade no povoamento ocorre uma redução do crescimento em diâmetro na parte inferior do fuste.

Tabela 4: Resultados (p-valor) dos testes das hipóteses H_0 pela estatística F , referentes aos testes de identidade de modelo não linear e linear aplicados nas equações dos modelos de Garay (1979) e de Shöepfer (1966) respectivamente

Teste	Não linear				Linear			
Estatística	p-valor ($F_{Ho} \geq F_{\alpha}$), $\alpha = 1,0\%$				p-valor ($F_{Ho} \geq F_{\alpha}$), $\alpha = 1,0\%$			
Modelo	Garay				Schöepfer			
Tratamentos	T2- 3,0 x 1,0	T3- 3,0 x 1,5	T4- 3,0 x 2,0	T5- 3,0 x 3,0	T2- 3,0 x 1,0	T3- 3,0 x 1,5	T4- 3,0 x 2,0	T5- 3,0 x 3,0
T1- 3,0 x 0,5	0,0131**	$5,7783 \times 10^{-5}$	$5,6708 \times 10^{-6}$	$2,3245 \times 10^{-17}$	0,0078	$9,80978 \times 10^{-5}$	$2,44894 \times 10^{-35}$	$2,23797 \times 10^{-24}$
T2- 3,0 x 1,0	-	$5,8889 \times 10^{-38}$	$1,3937 \times 10^{-10}$	$4,3143 \times 10^{-12}$	-	0,0067	$9,3952 \times 10^{-15}$	0,0003
T3- 3,0 x 1,5	-	-	$6,7438 \times 10^{-42}$	$2,9672 \times 10^{-51}$	-	-	$1,1492 \times 10^{-107}$	$2,21671 \times 10^{-76}$
T4- 3,0 x 2,0	-	-	-	$1,1281 \times 10^{-22}$	-	-	-	$2,40347 \times 10^{-21}$

Onde: ** = valor significativo a 1% de probabilidade.

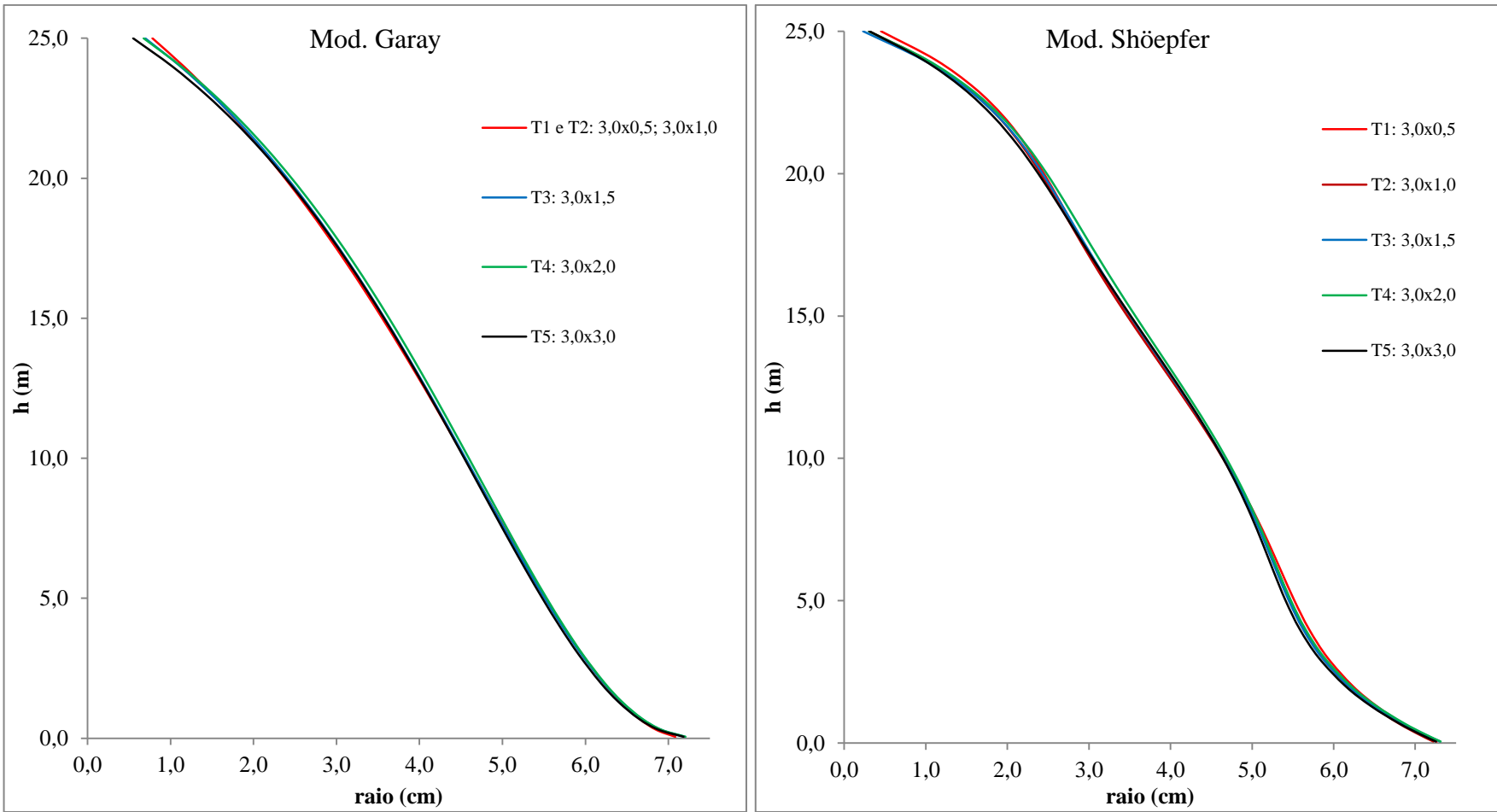


Figura 3: Estimativas dos perfis da à árvore de diâmetro médio ($dap=12,5$ cm; $Ht=25$ m), referentes aos ajustes dos modelos de Garay (1969) e de Schöepfer (1966) nos diferentes arranjos espaciais, em Itamarandiba-MG.

O modelo de Garay (1979), conseguiu estimar com precisão as variações ocorridas nas formas dos fustes. Segundo Leite et al. (2006), este o modelo tem sido recomendado por vários estudos, devido às suas propriedades estatísticas, que resultam em estimativas quase sempre livres de tendências. Na ocasião, os autores relataram que o próprio Garay (1979), já havia demonstrado a eficiência desse modelo. Por ser derivado da função Chapman-Richards, este modelo é flexível o suficiente para descrever as variações de forma em árvores de diferentes espécies e tamanhos e consistente em relação às variáveis d , h e V . Souza (2009), concluiu em seu estudo, que, o desempenho do referido modelo foi melhor para descrever a forma de fustes com um, dois e três pontos de mudança de forma, quando comparado com um modelo segmentado. O referido autor, ainda salientou sobre a boa capacidade do modelo não segmentado, naquele caso o modelo de Garay, em relação às árvores com três pontos de mudança, pois, se tratando de fustes com as maiores variações quanto à forma, esperava-se que o modelo segmentado, justamente por considerar tais variações, fosse aquele com a maior acurácia.

Larson (1963) e Friedl (1989) evidenciaram que, povoamentos densos, acarretam em um decréscimo no comprimento da copa das árvores, e que, em consequência ao decréscimo da copa os fustes apresentam formas mais cilíndricas. Há uma estreita relação entre a largura da copa e o diâmetro da árvore (SCHONAU e COETZEE 1989), onde, a densidade do povoamento gera um impacto no comprimento da copa e no diâmetro do fuste (CURTIS e REUKEMA, 1970, citado por GARBER e MAGUIRE, 2003). A disponibilidade e a competição por luz é afetada pelo espaçamento de plantio, onde espaçamentos que promovem competição por luz produzem árvores com fustes mais finos, com pouca e fina ramificação, e de copas estreitas e pouco profundas (HENSKENS et al., 2001). Segundo Schonau e Coetzee (1989), este comportamento é devido o *Eucalyptus* ser um gênero em que o inter-bloqueio dos ramos e a sobreposição das copas são raras, exceto em povoamentos muito jovens e densos, e que, o seu desenvolvimento também está sobre forte controle endógeno, onde a maioria dos *Eucalyptus* de crescimento rápido tem boa dominância apical, resultando em uma boa forma para o fuste.

Conforme Assmann (1970), Kramer (1988), Sterba (1988) e Baldwin et al. (2000), é esperado que, árvores conduzidas em menores espaçamentos iniciais, apresentem fustes mais cilíndricos, em comparação com árvores sob espaçamentos mais amplos. Esta afirmação, pode ser confirmada nos trabalhos, de Nogueira et al. (2008), que avaliaram a influencia do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda*, concluíram que, espaçamentos iniciais maiores resultam em fustes de maior conicidade. Pinkard e Neilsen

(2003) avaliaram a influência de seis espaçamentos iniciais nas características da copa e do povoamento de *Eucalyptus nitens* para uma aplicação de desbaste na região norte da Tasmânia, e seu experimento também refletiu as mesmas características de fustes mais cilíndricos nos espaçamentos mais reduzidos. Rance et al. (2012), avaliando plantios de *Eucalyptus grandis*, submetidos a quatro diferentes espaçamentos e conduzidos em distintos sites. Na região sudoeste da Austrália, observaram que, as referidas árvores já em idades juvenis apresentam fustes menos cônicos para os menores espaçamentos se comparados as árvores dos espaçamentos mais amplos. Os referidos autores, nesta ocasião, ainda observaram que, as árvores menos ramificadas apresentavam fustes menos cônicos que os fustes das árvores mais ramificadas.

5. CONCLUSÕES

O modelo de Garay é indicado para descrever o *taper* de eucaliptos nos arranjos espaciais avaliados.

A forma do fuste não difere entre os espaçamentos 3,0 x 0,5 e 3,0 x 1,0 m.

Para uma distância de 3,0 metros entre fileiras, quanto maior a distância entre plantas, mais cônica é a forma do fuste.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSMANN, E. **The principles of forest yeild study**. Oxford: Pergamon press, 1970. 506p.
- BALDWIN JR., V. C. et al. 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.
- BARROS, D. A.; MACHADO, S. A.; ACERBI JÚNIOR, F. W. A. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Bol. Pesq. Fl.**, Colombo, n.45, p. 3-28, 2002.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração florestal: Perguntas e respostas. 4 ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 605p.
- DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, v. 18, n. 3, p. 241-245, 1972.
- ERIKÄINEN K., Stem volume models with random coefficients for *Pinus kesya* in Tanzania, Zambia and Zimbabwe. **Can. J. For. Res.** v. 31, p. 879-888, 2001.
- FINGER, C.A.G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria:UFSM, CEPEF - FATEC, 1992. 269p.
- FRIEDL, R.A. **Dinâmica de forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 1989. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1989.
- GARBER, S. M.; MAGUIRE, D. A. Modeling stem taper of three central Oregon species using nonlinear mixed effects models and autoregressive error structures. **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 507-522, 2003.
- GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seatlhe. Coll. Forest. Resour., Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p.(contrib. 36).
- GERRAND, A.; NEILSEN, W. A.; MEDHURST, J. Thinning and pruning eucalypt plantations for sawlog production in Tasmanian forests. **Tasforests**, v. 9, p. 15-34, 1997.
- 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, SAMUEL P. C.; CALEGARIO, N. Modelagem não linear do perfil longitudinal de fustes de *Pinus oocarpa*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 16, n. 2, p. 177-184, 2010.
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. New York: The Ronald Press, 1993. 410p.

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

KILKKI P. Sample trees in timber volume estimation. **Acta Forestalia Fennica**. v. 182, p. 1-31. 1983.

KOZAK, A., MUNRO, D. D., SMITH, J. H. G. Taper Function and their Applications in Forest Inventory. **Forest Chronicle**, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.

KRAMER, H. **Waldwachstumslehre**. Hamburg: Paul Parey, 1988. 374p.

LARSON, P. R. Stem form development of forest tree. **Forest Science Monograph**. Washington, p. 1-41, 1963.

LEITE, H. G.; GAMA, J.V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (ROLL.) WARB. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 1, p. 99-106, 2006.

LEHMANN, C. H. **Geometria analítica**. Tradução Ruy Pinto da Silva Sieczkowisk. 6ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

LIMA, F. S. **Análise de funções de taper destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

MIGUEL, E. D.; CANZI, L. F.; RUFINO, R. F.; SANTOS, G. A. Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde - GO. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.6, n.11, 2010.

MÜLLER, I. **Forma de tronco e sortimentos de madeira para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., manejado em alto fuste, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul**. 2004. 166f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

NEILSEN, W. A.; GERRAND, A. M. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection. **Forest Ecology and Management**, v. 123, p. 217-229, 1999.

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.

ORMEROD, D.W. A simples bole model. **Forestry Chronicle**, v. 49, n. 3, p. 136-138, 1973.

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

PRODAN, M. **Forest biometrics**. Oxford: Pergamon Press, 1968. 447p.

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.

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.

REGAZZI, A. J.; SILVA, C. H. O. Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear em dados de experimento com delineamento em blocos casualizados. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57,n.3, p. 315-320, 2010.

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

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

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal.** FACOS-UFSM: Santa Maria, UFSM, 2008, 566p.

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

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B; SOUZA, A. L. Avaliação de modelos de afilamento não-segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **Revista Ciência Florestal**, UFSM-Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 393-405, 2008.

STATSOFT, INC. Statistica (data analysis software system), version 10. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>, 2010.

STERBA, H. **Vorlesungsunterlagen zur Forstlichen Ertragslehre.** Wen Univ. F. Bodenkultur. 1988. 150p. (unpublished)

TASSISA G., BURKHART H.E. An application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. **For. Ecol. Manage.** v. 103, p. 87-101, 1998.

CAPÍTULO II

ESTUDO DO *TAPER* DE ÁRVORES DE EUCALIPTO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

RESUMO – O objetivo deste estudo, foi avaliar se as redes neurais artificiais estimam com precisão o afilamento, os diâmetros a qualquer altura especificada e as alturas a qualquer diâmetro especificado em fustes de eucalipto. Foram utilizados dados de um experimento implantado em dezembro de 2002, no delineamento em blocos (três blocos), sendo testados os arranjos espaciais de 3,0 x 0,5; 3,0 x 1,0; 3,0 x 1,5; 3,0 x 2,0 e 3,0 x 3,0 m. Aos oito anos de idade foram abatidas e cubadas um total de 180 árvores. Foram utilizadas redes neurais artificiais *feed-forward*, do tipo *Multilayer Perceptrons*, treinadas por meio do algoritmo *error-backpropagation*. Para os ajustes das redes, foi utilizada uma aplicação computacional em linguagem Java, e para as funções destinadas ao treinamento e aplicação foi utilizada a biblioteca Weka. Foram testados diferentes conjuntos de variáveis de entrada e diferentes números de neurônios na camada oculta da rede, com o propósito de definir os melhores conjuntos de variáveis, aliados ao melhor quantidade de neurônios na camada oculta por rede, para serem utilizados nas estimativas de cada uma das variáveis. As estatísticas de acurácia, utilizadas para avaliar as melhores redes, foram a raiz quadrada do erro médio e as correlações entre os valores observados e os valores estimados. A rede neural artificial estimou com precisão o afilamento dos fustes, distinguindo as variações na forma dos fustes em virtude dos diferentes arranjos espaciais. A rede neural artificial estimou com precisão os diâmetros a qualquer altura especificada. As estimativas das alturas a qualquer diâmetro especificado, obtidas pela RNA e pelo modelo de *taper* de Garay, apresentaram valores de erros percentuais acentuados na base dos fustes, em todos os arranjos espaciais.

Palavras chave: Afilamento; Arranjos espaciais; Inteligência Artificial.

1. INTRODUÇÃO

Por muitos anos, os pesquisadores e gestores florestais utilizaram modelos estatísticos empíricos ou modelos matemáticos para prever as consequências dos regimes de manejo e para auxiliar nas tomadas de decisão. Esses modelos são expressos como equações matemáticas (SOARES, 2012), dentre eles podem ser citados os modelos de *taper*.

Os modelos de *taper* permitem descrever o perfil longitudinal ou o afilamento de um fuste. Servem para estimar três características básicas, o diâmetro (d) em uma altura (h) qualquer, para estimar a altura (h) onde ocorre um diâmetro (d) qualquer e o volume (V) entre duas alturas quaisquer (h_1 e h_2), e também são utilizados para estudar a forma dos fustes (KOZAK et al., 1969). Entre os vários modelos de *taper*, o modelo proposto por Garay (1979), tem sido recomendado por vários estudos, devido às suas propriedades estatísticas, que geralmente resultam em estimativas livres de tendências (LEITE et al., 2006).

Uma alternativa para estimar essas variáveis é o emprego de redes neurais artificiais-RNAs (LEITE et al., 2011a).

As RNAs podem ser definidas, como sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples, denominados de neurônios ou nodos, que calculam funções matemáticas, geralmente não lineares. Estas unidades são dispostas em uma ou mais camadas interligadas por um grande número de conexões, em um arranjo semelhante aos das redes neurais biológicas. Na maioria dos modelos de redes neurais, as conexões estão associadas a pesos, que tem a função de armazenar o conhecimento representado no modelo e ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. A RNA foi inspirada no funcionamento do cérebro humano, buscando implementar suas funções e sua dinâmica (HAYKIN, 2000; BRAGA et al., 2007).

O procedimento utilizado na solução de problemas pelas RNAs, é iniciado com uma fase de aprendizagem ou treinamento, onde um conjunto de exemplos é apresentado à rede, para que ela possa retirar características necessárias para representar a informação fornecida, que serão utilizadas em seguida, para gerar respostas para o problema. A capacidade de aprendizado por meio de exemplos, aliada a característica de generalizar as informações aprendidas é um atrativo para a utilização das RNAs. A forma como os exemplos são representados internamente pela rede e o paralelismo de sua arquitetura, cria a possibilidade de um desempenho superior aos modelos convencionais. As redes se aplicam a problemas em que existem dados provenientes de experimentos ou gerados por meio de modelos, as

principais tarefas que elas executam são de classificação, categorização, agrupamento (ou *clustering*), aproximação, previsão e otimização (BRAGA et al., 2007).

As características desta ferramenta computacional tornam-se extremamente atrativas ao manejo florestal, pois a sua utilização pode facilitar, aprimorar, ou apenas servir como mais uma alternativa às técnicas já existentes. O interesse na sua utilização tem crescido em várias áreas, e tem surgido como uma alternativa para a modelagem de fenômenos não lineares e complexos nas ciências florestais (SOARES, 2012). São exemplos de estudos que utilizaram RNAs para: estimar a altura de árvores (XIAO et al., 1998; BRANDÃO, 2007; DIAMANTOPOULOU, 2012); o volume de fustes (DIAMANTOPOULOU, 2005a; DIAMANTOPOULOU, 2006; BALEEIRO, 2007; GORGENS et al., 2009; SILVA et al., 2009; DIAMANTOPOULOU, 2010; ÖZÇELIK et al., 2010; SOARES et al., 2011; SOARES et al., 2012); estimar diâmetros ao longo de fustes (DIAMANTOPOULOU, 2005b; SOARES et al., 2011; SOARES et al., 2012); os diâmetros comerciais e do cerne de fustes (LEITE et al., 2011a); projeção e modelagem da distribuição diamétrica de árvores (Binoti, 2012); para fazer a prognose da produção (BINOTI, 2010) e previsão dos preços de madeira (COELHO et al., 2007).

2. OBJETIVOS

Objetivo deste estudo foi avaliar se as redes neurais artificiais estimam com precisão o afilamento, os diâmetros a qualquer altura especificada e as alturas a qualquer diâmetro especificado em fustes de eucalipto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de um experimento implantado em dezembro de 2002, em Itamarandiba-MG. O material genético utilizado foi um clone de um híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*. O delineamento experimental foi estabelecido em blocos ao acaso (três blocos), sendo testados cinco tratamentos, arranjos espaciais de 3,0 x 0,5 m; 3,0 x 1,0 m; 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m, denominados respectivamente de T1, T2, T3, T4 e T5. Cada parcela experimental foi constituída de seis linhas de plantio, cada uma com 28 covas, perfazendo um total de 168 árvores por tratamento e repetição.

Aos oito anos de idade foram abatidas 180 árvores. Em cada árvore abatida foram medidas além do *dap* e da altura total (*Ht*), os diâmetros com e sem casca nas seguintes

alturas (h): 0,10; 0,30; 0,70; 1,00; 1,30 e 2,00 m, e a partir deste ponto em intervalos de 1,0 em 1,0 m, até a altura h onde $d = 4,0$ cm aproximadamente.

Para avaliar a capacidade das RNAs em realizar as estimativas do afilamento (d/dap), dos diâmetros ao longo dos fustes (d) e das alturas a qualquer diâmetro especificado (h), foram testadas como entradas para os ajustes várias associações referente às variáveis diretamente relacionadas com o afilamento encontradas nos modelos matemáticos e estatísticos descritos na literatura (Tabela1).

Tabela 1: Conjuntos de variáveis de entrada avaliados nos ajustes das RNAs e suas respectivas saídas

Entrada	Variáveis de entrada	Variáveis de saída
1- d/dap	Trat.; h ; Ht	
2- d/dap	Trat.; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	
3- d/dap	Trat.; h ; Ht ; $(Ht-h)$	d/dap
4- d/dap	Trat.; $(Ht-h)$; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	
5- d/dap	Trat.; h ; Ht ; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	
6- d/dap	Trat.; h ; Ht ; $(Ht-h)$; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	
1- d	Trat.; dap ; $(Ht-h)$	
2- d	Trat.; dap ; Ht ; h	
3- d	Trat.; dap ; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	d (cm)
4- d	Trat.; dap ; Ht ; h ; $(Ht-h)$	
5- d	Trat.; dap ; h ; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	
6- d	Trat.; dap ; h ; Ht ; $(Ht-h)$; (h/Ht) ; $(h/Ht)^2$	
1- h	Trat.; dap ; d ; Ht	
2- h	Trat.; dap ; Ht ; (d/dap)	
3- h	Trat.; dap ; d ; Ht ; $(d-dap)$	h (m)
4- h	Trat.; dap ; Ht ; d ; (d/dap)	
5- h	Trat.; dap ; d ; Ht ; (Ht/dap)	
6- h	Trat.; dap ; d ; Ht ; $(d-dap)$; (d/dap) ; (Ht/dap)	

Onde: 1- d/dap = referente ao conjunto de variáveis de entrada número um para estimar o afilamento dos fustes; 1- d = referente ao conjunto de variáveis de entrada número um para estimar os diâmetros ao longo dos fustes; 1- h = referente ao conjunto de variáveis de entrada número um para estimar as alturas em qualquer diâmetro especificado. Trat.= tratamentos; dap = diâmetro a altura do peito; Ht = altura total; h = alturas especificadas ao longo do fuste; d = diâmetros com casca medidos ao longo do fuste.

Foram treinadas e validadas 195 arquiteturas de rede distintas, oriundas dos 18 conjuntos de variáveis independentes testados como entrada para estimar as variáveis d/dap , d , h . Cada conjunto de variáveis de entrada foi nomeado por um número seguido da variável a ser estimada (Tabela1). Para evitar a utilização de letras e de numeração ordinal, no caso da segunda opção, excluindo a possibilidade da rede associar os valores a pesos e dar maior

relevância aos números maiores. A variável referente ao arranjo espacial foi transformada em números binários, T1, T2, T3, T4 e T5, passaram a ser 0001, 0010, 0011, 0100 e 0101, respectivamente.

As RNAs utilizadas neste estudo foram redes anteroalimentadas ou acíclicas (*feed-forward*), tem como característica a propagação do sinal em apenas uma direção, da entrada para a saída da rede. São do tipo *Multilayer Perceptrons* (MLP), com múltiplas camadas de neurônios (HAYKIN, 2000). De acordo com Cybenko (1989), as MLP são uma importante classe dentre as RNAs *feed-forward*, por possuírem a capacidade de aproximação de qualquer função contínua $f(x)$.

A função de ativação utilizada tanto na camada de saída como na camada oculta foi a função sigmoideal (ou logística) (BRAGA et al., 2007). As RNAs foram treinadas por meio do algoritmo da retro-propagação do erro (*error-backpropagation*). Algoritmo este, baseado em regras de aprendizagem que propiciam um melhor ajuste avaliando erro e tentando corrigi-lo (RUMELHART e MCCLELLAND, 1986).

Foram utilizados no ajuste das RNAs uma aplicação computacional em linguagem de programação Java, e para as funções destinadas ao treinamento e aplicação foram utilizadas a biblioteca Weka - Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA, 2010) (VALENTE, 2010; HAUS; 2012). No programa foi desenvolvida uma função para normalizar os dados entre zero e um, com média zero e desvio um, que é responsável por encontrar e manter o valor máximo de cada atributo de entrada, dividindo em seguida os atributos de cada instância por este valor máximo. No programa também é possível fazer a divisão automática e aleatória dos dados em três grupos, um para treinamento, um para validação e outro para teste, dando a possibilidade para o usuário definir e alterar a proporção desejada para cada grupo.

As proporções utilizadas para treinamento, validação e teste foram respectivamente de 60, 20 e 20 %, para a construção das redes, onde foram treinadas diversas redes com todos os conjuntos de entradas e saídas propostos. Os parâmetros de treinamento foram: taxa de aprendizagem (μ) de 0,2, termo *momentum* (η) de 0,9 (GORGENS et al., 2009), tempo de treinamento de 300 ciclos e um número de 100 treinamentos realizados para cada ajuste.

Para cada conjunto de variáveis de entrada utilizado foram geradas pelo menos 10 RNAs, onde as camadas ocultas variaram em número de neurônios entre 1 a 10. Nas ocasiões onde a camada oculta com 10 neurônios obteve o melhor valor de RMSE (%) de validação, prosseguiu-se treinando mais redes, elevando os números de neurônios até que esta condição não demonstrasse mais ser o limitador da qualidade do treinamento, verificado com o

decréscimo dos valores de RMSE (%) dos conjuntos de validação se comparado ao das redes anteriores. Este procedimento foi realizado com o propósito em definir os melhores conjuntos de variáveis de entrada associados ao melhor número de neurônios na camada oculta da rede, para serem utilizadas nas estimativas de cada variável dependente (d/dap , d , h).

As estatísticas de acurácia utilizadas para avaliar as melhores RNAs com os melhores conjuntos de variáveis de entrada aliado ao melhor número de neurônios na camada oculta foram: a raiz do erro quadrado médio (RMSE (%)) e as correlações entre os valores observados e os valores estimados ($r_{\hat{Y}Y}$) (Equações 1 e 2), conforme Campos e Leite, (2013), referentes ao conjunto de validação do melhor treinamento executado pela rede. Foram calculados também os valores médios e de desvio padrão de RMSE (%) dos 100 treinamentos realizados em cada ajuste.

$$\bullet \quad RMSE(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

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

em que:

- \bar{Y} = média dos valores observados;
- \hat{Y}_m = média dos valores estimados;
- Y_i = valores observados;
- \hat{Y}_i = valores estimados, e
- n = número total de observações.

Foram selecionadas primeiramente, as três melhores arquiteturas referentes aos números de neurônios na camada oculta das RNAs para cada conjunto de variáveis de entrada avaliado. Em seguida, a RNA que apresentou a melhor estatística para cada variável a ser estimada foi então considerada como mais adequada para realizar seu ajuste.

Foi selecionado um modelo de *taper* que se ajustasse satisfatoriamente ao conjunto de dados. O modelo escolhido foi o modelo proposto por Garay (1979), que inicialmente foi ajustado para cada um dos tratamentos na sua forma original para estimar o *taper* (d/dap) (Equação 3). Em seguida, foram utilizadas as variações algébricas em sua forma para obter as estimativas de d e h (Equações 4 e 5).

$$\bullet \quad \frac{d}{dap} = \beta_0(1 + \beta_1 \text{Ln}(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (3)$$

$$\bullet \quad \hat{d} = dap\beta_0(1 + \beta_1 \text{Ln}(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (4)$$

$$\bullet \quad \hat{h} = Ht \left(\left(-(\exp((d - dap\beta_0)(dap\beta_0\beta_1)^{-1}) - 1) \right) \beta_2^{-1} \right)^{1/\beta_3} + \varepsilon \quad (5)$$

em que:

d = diâmetro com casca na altura h (cm);

dap = diâmetro com casca (cm), a 1,30 m de altura;

h = altura comercial (m);

Ht = altura total (m);

β_k = parâmetros ($k = 0, 1, \dots, 3$); e

ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$.

Os dados utilizados nos os ajustes do modelo estatístico foram os mesmos utilizados nos treinamentos das melhores RNAs, e os conjuntos de dados referentes aos respectivos conjuntos de teste destas redes, foram os mesmos utilizados na aplicação das equações do modelo, de modo que ambos os métodos fossem aplicados nos mesmos conjuntos de dados. Os ajustes do modelo estatístico foram realizados a partir de análises de regressão, utilizando o método iterativo Gauss-Newton, no *software* Estatística 10.0 (STATSOFT, 2010).

As estimativas realizadas pelas RNAs selecionadas foram avaliadas a partir da análise gráfica dos resíduos e comparadas com as estimativas realizadas pelo modelo de Garay.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram pré-selecionadas a partir dos valores de RMSE (%) dos conjuntos de validação um total de 54 arquiteturas, sendo 18 arquiteturas para cada uma das variáveis a ser estimada (d/dap , d , h). Segundo Mehtätalo et al. (2006), quanto menor o valor do RMSE (%) melhor foi o treinamento e melhor é a precisão da estimativa da rede.

Avaliando os valores de RMSE (%) dentro de cada conjunto de variáveis de entrada, observa-se, que, as estimativas de d/dap apresentaram os menores valores, próximos a 3,0 % e as estimativas de d e h apresentaram valores maiores, próximos a 11,0 e 17,0 %, respectivamente. Em geral os valores de RMSE (%) referentes às três topologias pré-selecionadas para um mesmo conjunto de variáveis de entrada foram muito próximos, e as correlações foram todos superiores a 0,9930 (Tabela 2).

Os melhores conjuntos de variáveis de entradas definidos para estimativas do *taper* (d/dap), dos diâmetros a qualquer altura especificada (d) e das alturas a qualquer diâmetro especificado (h), foram $6-d/dap$, $6-d$ e $6-h$. Por apresentarem os menores valores de RMSE (%) e também os menores valores médios e os menores desvios para as arquiteturas-1, 2 e 3, para os respectivos conjuntos de validações dos melhores treinamentos (Tabela 2). Faz-se necessário a avaliação das médias, e dos desvios entre as arquiteturas de rede, devido as RNAs tratar-se de uma heurística, que tem como característica a busca por resultados exatos e não necessariamente retornar estimativas iguais para um mesmo ajuste quando ele é repetido.

Os números de neurônios na camada oculta referentes às entradas $6-d/dap$, $6-d$, $6-h$, variaram pouco entre as topologias pré-selecionadas, ficando entre 6 e 12 neurônios (Tabela 2). De acordo com Mozer et al. (1989), o espaço de busca entre as RNAs válidas é deceptivo; pois duas arquiteturas similares podem apresentar desempenhos muito diferentes, e multimodal; porque duas arquiteturas muito distintas podem ter desempenhos semelhantes. Segundo Braga et al. (2007), o número de neurônios na camada oculta é em geral definido empiricamente, contudo, ele depende fortemente da validação da rede pois, o conjunto de validação é utilizado para estimar a capacidade de generalização da rede durante o processo de aprendizagem. De acordo com Binoti (2010), uma boa generalização da rede é essencial para a aplicação da mesma rede a novos dados.

Tabela 2: Melhores arquiteturas de RNAs selecionadas para cada conjunto de variáveis de entrada avaliados, os respectivos valores absolutos, médios e de desvios de RMSE (%), e os valores das correlações ($r_{\hat{Y}Y}$) entre os valores estimados e observados. Estatísticas referentes aos conjuntos de validação do melhor treinamento realizado pela respectiva RNA

Entradas	Arq.1*	RMSE (%)	Méd. (%)	Desv. (%)	Cor. ($r_{\hat{Y}Y}$)	Arq.2*	RMSE (%)	Méd. (%)	Desv. (%)	Cor. ($r_{\hat{Y}Y}$)	Arq.3*	RMSE (%)	Méd. (%)	Desv. (%)	Cor. ($r_{\hat{Y}Y}$)
1- <i>d/dap</i>	3-8-1	3,0196	3,4876	0,5045	0,9949	3-6-1	3,0399	3,5999	0,5672	0,9951	3-7-1	3,1099	3,6143	0,5132	0,9950
2- <i>d/dap</i>	3-9-1	3,0344	3,5941	0,5696	0,9953	3-5-1	3,0442	3,5782	0,6379	0,9950	3-3-1	3,0487	3,7664	0,7570	0,9949
3- <i>d/dap</i>	4-5-1	2,8437	3,4235	0,5557	0,9958	4-6-1	2,9278	3,3854	0,5581	0,9955	4-8-1	2,9921	3,5234	0,5607	0,9955
4- <i>d/dap</i>	4-5-1	2,9271	3,3555	0,4159	0,9954	4-6-1	2,9279	3,3059	0,4230	0,9951	4-7-1	3,0014	3,4474	0,4575	0,9951
5- <i>d/dap</i>	5-6-1	2,8496	3,3125	0,4539	0,9956	5-4-1	2,8966	3,5925	0,6457	0,9955	5-5-1	2,9698	3,4494	0,5304	0,9954
6- <i>d/dap</i>	6-8-1	2,8196	3,2671	0,3738	0,9958	6-7-1	2,8458	3,3808	0,5507	0,9957	6-9-1	2,8479	3,3098	0,4148	0,9958
1- <i>d</i>	3-5-1	15,5598	19,4206	3,7169	0,9934	3-6-1	15,7312	19,1423	5,1808	0,9932	3-7-1	16,2159	18,8689	3,6154	0,9925
2- <i>d</i>	4-8-1	11,9455	14,6760	3,8905	0,9960	4-5-1	12,0300	15,4207	5,0486	0,9958	4-4-1	12,1323	16,4159	5,8590	0,9959
3- <i>d</i>	4-4-1	10,9817	15,4968	5,6174	0,9968	4-9-1	10,9990	13,3994	3,2507	0,9965	4-5-1	11,3123	14,6465	2,8790	0,9964
4- <i>d</i>	5-10-1	11,4594	13,6151	2,8951	0,9965	5-11-1	11,5234	13,3140	1,9489	0,9960	5-6-1	11,5325	13,9226	3,0266	0,9963
5- <i>d</i>	5-5-1	10,8414	14,2165	3,5550	0,9967	5-4-1	11,2124	14,9851	4,3211	0,9964	5-9-1	11,3690	14,3777	3,7100	0,9966
6- <i>d</i>	7-10-1	10,3532	13,2478	2,9344	0,9969	7-12-1	10,4298	12,5320	2,6164	0,9967	7-11-1	10,7361	12,7543	1,8762	0,9967
1- <i>h</i>	4-9-1	17,1806	22,9678	5,3695	0,9971	4-5-1	17,6477	25,3525	5,9238	0,9970	4-8-1	17,9940	26,1003	5,7145	0,9969
2- <i>h</i>	4-10-1	16,2212	20,0205	3,0356	0,9974	4-6-1	16,4700	20,9561	3,7585	0,9973	4-5-1	16,5283	19,8972	3,0975	0,9970
3- <i>h</i>	5-8-1	16,4383	20,2265	3,7704	0,9973	5-7-1	16,8231	20,7180	4,0796	0,9972	5-6-1	17,3846	21,9966	4,9650	0,9971
4- <i>h</i>	5-10-1	16,6567	19,9945	3,1928	0,9974	5-7-1	16,8000	20,3071	3,4950	0,9973	5-11-1	16,9514	19,6652	3,7156	0,9971
5- <i>h</i>	5-10-1	17,3325	23,8138	4,9268	0,9971	5-8-1	17,4657	24,9472	5,2557	0,9970	5-4-1	17,7725	25,0437	5,2881	0,9970
6- <i>h</i>	7-9-1	16,0469	19,3780	3,0016	0,9975	7-7-1	16,6463	19,9322	3,2752	0,9974	7-6-1	16,6490	19,9677	3,5094	0,9974

Onde: * Arquitetura se refere ao número de neurônios em cada camada da RNA; Méd.; Desv.= valores médios e desvios de RMSE (%), os valores referentes aos conjuntos de validação dos 100 treinamentos realizados em cada ajuste.

As RNAs consideradas mais adequadas para realizar as estimativas das variáveis d/dap , d , e h , foram às redes com as arquiteturas 6-8-1, 7-10-1, 7-9-1 e 9-6-1 (Tabela 2, arquiteturas-1), por apresentarem os menores valores de RMSE (%) 2,8196; 10,3532; 16,0469 e 1,1629 %, respectivamente, e os maiores valores de correlação, variando entre 0,9957 e 0,9989, para os respectivos conjuntos de validação dos melhores treinamentos (Tabela 2). O fato de ser definida somente uma arquitetura de rede para realizar as estimativas, não implica que as demais arquiteturas (arquiteturas-2 e 3), ou até mesmo as RNAs treinadas com os demais conjuntos de entradas avaliados, não realizem as estimativas satisfatórios, entretanto, se propôs em avaliar somente os melhores.

Verificou-se que houve um decréscimo dos valores absolutos e médios de RMSE (%) e um acréscimo dos valores das correlações com o aumento do número de variáveis independentes, utilizados para estimar uma mesma variável (Tabela 2), indicando uma possível contribuição de que o aumento das variáveis independentes provocaram uma melhoria nos treinamentos das RNAs.

Foram realizados 15 ajustes para o modelo de Garay, referentes aos dados dos três conjuntos de treinamento das melhores arquiteturas de RNA selecionadas e dos cinco espaçamentos contidos dentro de cada conjunto. Todos os coeficientes de correlações entre os valores observados e estimados foram superiores a 0,9920 (Tabela 3).

Tabela 3: Parâmetros estimados e coeficientes de correlação ($r_{\hat{Y}Y}$), referentes aos ajustes das equações do modelo de Garay, ajustadas para cada tratamento dentro do respectivo grupo de treinamento da RNA

Conjuntos de treinamento*	Tratamentos	Parâmetros				$r_{\hat{Y}Y}$
		β_0	β_1	β_2	β_3	
6- d/dap	1	1,20205097	0,40444343	0,89014770	0,38454941	0,9922
	2	1,25086977	0,31808271	0,94707592	0,27349745	0,9934
	3	1,28282483	0,29393136	0,95987287	0,23537833	0,9948
	4	1,29679192	0,27187809	0,96958119	0,20865207	0,9950
	5	1,25945281	0,29031172	0,96372858	0,24407226	0,9941
6- d	1	1,20104443	0,39854508	0,89544820	0,38221995	0,9921
	2	1,22798302	0,33477393	0,93820555	0,30551324	0,9932
	3	1,29552090	0,27749325	0,96752075	0,21087740	0,9948
	4	1,26684704	0,28030829	0,96662440	0,23321835	0,9956
	5	1,30086523	0,25690393	0,97754323	0,18565525	0,9947
6- h	1	1,22623891	0,38576127	0,90398610	0,35348727	0,9926
	2	1,20000787	0,37053014	0,91705436	0,35934959	0,9939
	3	1,26861936	0,28805738	0,96303537	0,23605898	0,9948
	4	1,28978501	0,26305249	0,97415141	0,20357503	0,9957
	5	1,27756043	0,27202739	0,97198172	0,21422763	0,9945

* Os dados utilizados no ajuste são referentes aos mesmos dados utilizados nos conjuntos de treinamento da RNA de arquitetura-1, para estimar a respectiva variável resposta.

Segundo Leite et al. (2006), o modelo de Garay tem sido recomendado por vários estudos, devido às suas propriedades estatísticas, que geralmente resultam em estimativas livres de tendências. Na ocasião, os autores relataram que, o próprio Garay (1979), já havia demonstrado a eficiência desse modelo para diferentes espécies. Derivado da função de Chapman-Richards este modelo é flexível o suficiente para descrever as variações de forma em árvores de diferentes espécies e tamanhos e consistente em relação às variáveis d , h e de volume. A eficiência e consistência deste modelo em várias situações podem ser comprovadas em Leite et al. (2006), Souza (2009), Silva et al. (2011) e Leite et al. (2011b). Devido a estas características e por se tratar de um modelo já amplamente testado, ele foi escolhido para servir como referência para as estimativas das redes neurais artificiais, neste estudo.

A RNA 6- d/dap , obteve estimativas satisfatórias para a variável d/dap , em todos os tratamentos, com os erros percentuais concentrando-se nos intervalos entre $\pm 8,0$ %, apresentando apenas alguns pontos mais dispersos isolados (Figura 1). Apresentando estimativas bem próximas, quando comparadas às estimativas do modelo de Garay. Entretanto, nas estimativas obtidas pelo modelo, os resíduos percentuais encontram-se mais concentrados e uniformemente distribuídos (Figura 1). As estimativas dos dois métodos apresentaram menor precisão para as estimativas localizadas nas partes superiores dos fustes, verificado pela maior dispersão dos resíduos localizados nas posições mais próximas a origem no eixo (x) (Figura 1).

A escolha das melhores variáveis de entrada e da melhor arquitetura de camada oculta da RNA selecionada para obter as estimativas da variável d/dap , não demonstrou melhora significativa nas suas estimativas mesmo utilizando de um número maior de variáveis independentes se comparada ao modelo estatístico. Contudo, a RNA obteve uma precisão satisfatória para executar tais estimativas.

As estimativas do perfil da árvore média efetuadas pela RNA 6- d/dap , apresentaram uma sinuosidade maior na base dos fustes quando comparadas aos perfis gerados pelas estimativas do modelo de Garay. Observa-se também, que as curvas estimadas por ambos os métodos assumem ao longo de seu comprimento algumas das formas aproximadas bem características em um fuste, onde a base aproxima-se da forma de um tronco de neilóide, a porção mediana, da forma de um tronco de cone, e o topo da forma de um parabolóide (Figura 2).

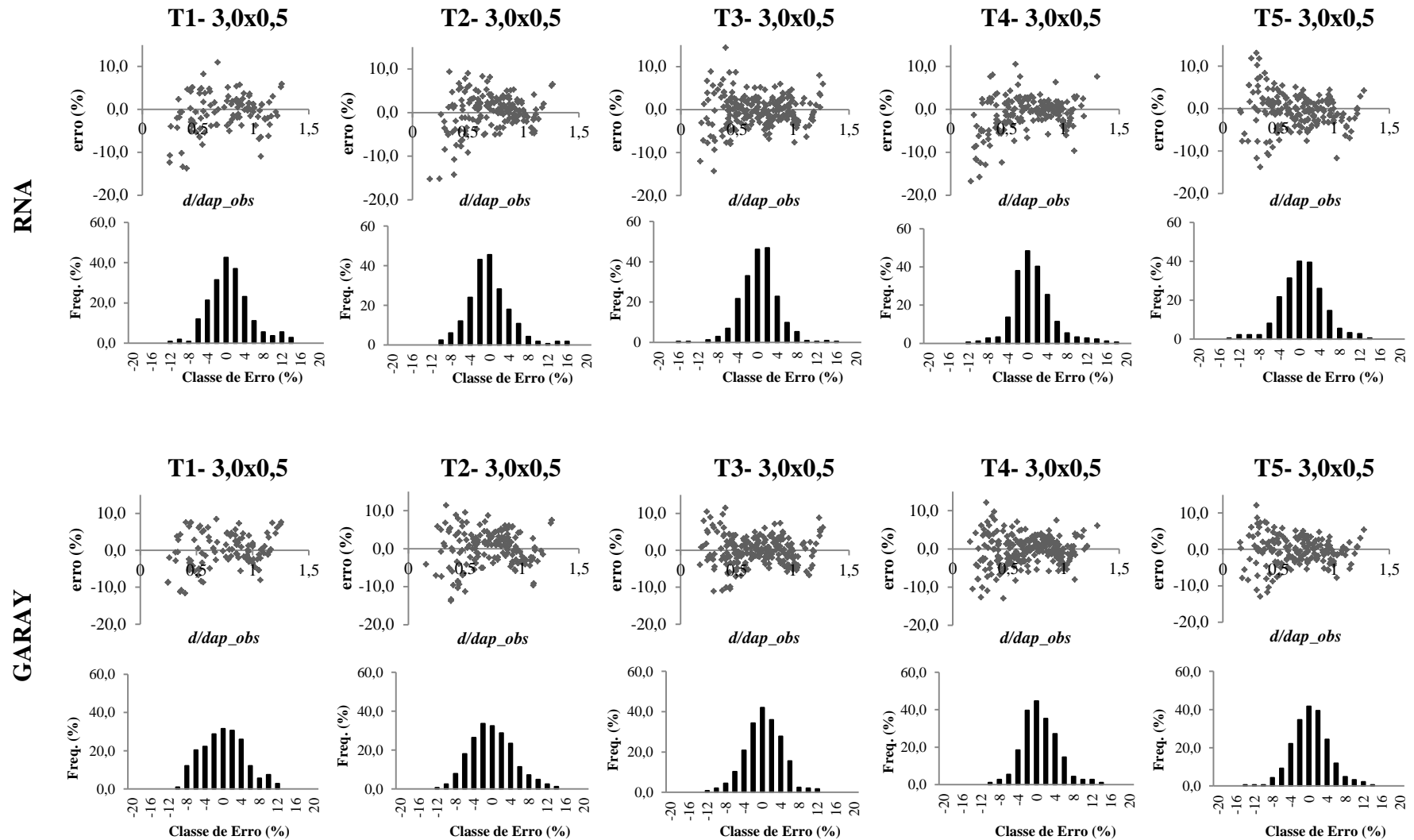


Figura 1: Dispersão dos resíduos percentuais em função dos valores de d/dap observados, e frequência percentual dos resíduos percentuais de d/dap estimados, referentes às estimativas da RNA 6- d/dap , e do modelo de Garay (1979), para cada um dos tratamentos em árvores de eucalipto em Itamarandiba-MG.

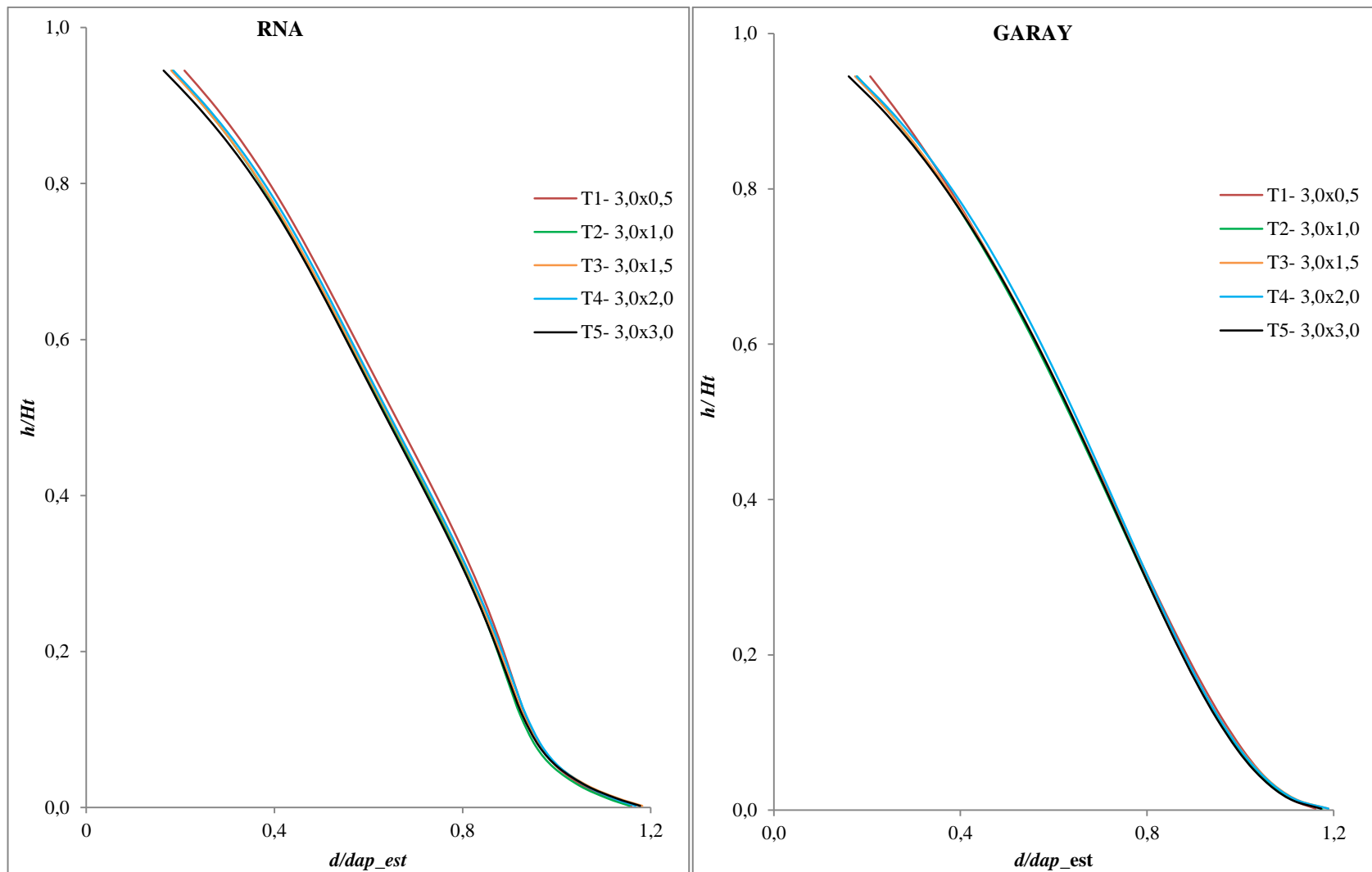


Figura 2: Curvas de d/dap em função de h/Ht , referentes à árvore de diâmetro médio ($dap= 12,5$ cm e $Ht= 24,8$ m), estimados pela melhor RNA treinada para estimar o afilamento dos fustes e pelas equações do modelo de Garay (1979), em Itamarandiba-MG.

A RNA estimou com precisão a forma dos fustes, distinguindo de forma satisfatória a variação na formados fustes com a variação do arranjo espacial. Mesmo com alguns perfis apresentando formas bem semelhantes, devido à proximidade em área útil por planta entre eles. Nota-se claramente que o perfil referente ao arranjo T1 (3,0 x 0,5 m), é menos afilado, se posicionando acima dos demais, e o perfil referente ao tratamento T5 (3,0 x 3,0 m) é o mais afilado, posicionando-se abaixo dos demais. Nos perfis estimados pelo modelo estatístico, as diferenças são menos nítidas, sendo visualizadas com maior nitidez apenas na região mais próxima ao topo (Figura 2).

A RNA 6-*d*, selecionada para realizar as estimativas dos diâmetros a qualquer altura especificada (*d*), apresentou ajustes satisfatórios, com os erros percentuais concentrados entre $\pm 6,0$ %, para todos os tratamentos. Nos tratamentos T1 e T2, ocorreu a presença de alguns pontos mais dispersos, subestimando os valores observados e em T1, e superestimando os valores observados em T2, ambos para os diâmetros localizados nas porções superiores dos fustes (Figura 3).

Verificou-se, que as estimativas efetuadas pela RNA e pelo modelo de Garay, apresentaram uma maior dispersão dos resíduos para os menores diâmetros, localizados nos topos dos fustes, em todos os tratamentos, verificados pela maior dispersão dos resíduos, observados nas posições mais próximas à origem do eixo (*x*) (Figura 3). Leite et al. (2011a), avaliando três classes de RNAs, com diferentes variáveis de entrada e diferentes números de neurônios na camada interna, para estimar os diâmetros sem casca e os diâmetros do cerne de *Tectona grandis*, em um povoamento localizado no estado do Mato Grosso, verificou que, suas RNAs também apresentaram dificuldade em estimar os menores diâmetros.

A RNA obteve estimativas de *d* muito próximas, quando comparadas às estimativas do modelo de Garay. Entretanto, mesmo utilizando de um número maior de variáveis dependentes, comparativamente às utilizadas pelo modelo, não obteve nenhuma melhora significativa referente à precisão das estimativas. Contudo, a RNA selecionada se mostrou tão precisa quanto o modelo estatístico para realizar tais estimativas, quando avaliado a dispersão dos resíduos (Figura 3).

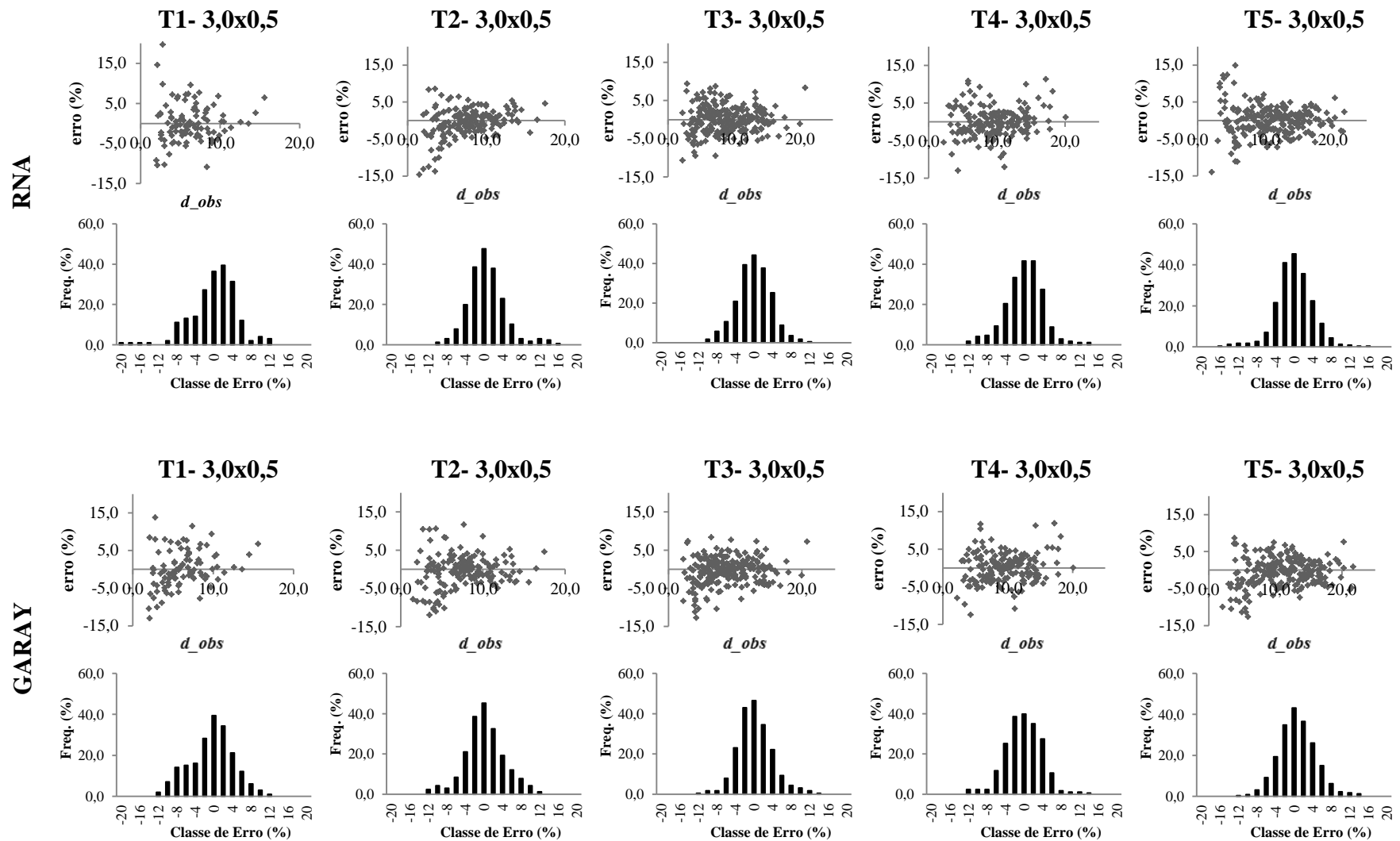


Figura 3: Dispersão dos resíduos percentuais em função dos valores dos diâmetros d observados, e frequência percentual dos resíduos percentuais de d estimados, referentes às estimativas da RNA 6- d , e do modelo de Garay (1979), para cada um dos tratamentos em árvores de eucalipto em Itamarandiba-MG.

As estimativas das alturas a qualquer diâmetro especificado (h), obtidas pela RNA 6- h , apresentaram valores de erros percentuais acentuados, mais precisamente na região da base dos fustes, em todos os tratamentos (Figura 4), foram também estimados alguns valores negativos, onde se esperavam valores estimados próximos a 0,1 ou a 0,30 m, a RNA retornou valores negativos bem próximos à zero. Fazendo uma relação da ocorrência dos erros percentuais ao longo do comprimento dos fustes, nota-se que, as estimativas de h realizadas da base dos fustes até aproximadamente os cinco metros de altura, os resíduos percentuais concentram-se em sua maioria entre $\pm 50,0\%$, dos cinco metros até aproximadamente os dez metros, os erros concentram-se entre $\pm 25,0\%$, e a partir dos dez metros de altura, os erros concentram-se entre $\pm 10,0\%$, decrescendo até o topo, esta característica foi observada em todos os tratamentos nas estimativas realizadas pela RNA e pelo modelo de Garay (Figura 4).

Nas estimativas de h referentes ao modelo de Garay, não houve estimativas de valores negativos. Entretanto, o modelo apresentou uma tendência maior em superestimar os valores nas regiões compreendidas da base dos fustes até aproximadamente os quatro metros de altura, em todos os tratamentos (Figura 4). Segundo Leite et al. (2006), alguns modelos resultam em estimativas inconsistentes de altura comercial, enquanto outros resultam em estimativas menos precisas de diâmetro comercial ou de volume. Isso, de certo modo, é esperado, uma vez que um determinado modelo pode ser bom para estimar uma variável, porém deficiente para outra.

As estimativas de h , geralmente apresentam problemas de baixa qualidade para os diversos modelos de *taper*, como observado neste estudo, conforme Campos e Leite (2013), uma razão para um modelo não ser eficiente para estimar h é que a esta variável não faz parte da variável dependente, para o qual se aplica o procedimento de ajuste (a minimização de erros). De acordo com Souza et al. (2008a), erros acentuados nas estimativas de h , ocorrem devido ser na porção da base da árvore onde há uma maior deformação na forma do fuste. Pois há uma variação mais brusca no afilamento nesta região. Souza et al. (2008b), relataram estas mesmas tendências em ajustes de modelos segmentados de *taper*, em um povoamento de *Eucalyptus* sp. localizado na região sul do estado da Bahia. Mendonça et al. (2007), estimando alturas comerciais em um povoamento desbastado de *Eucalyptus* sp., também no Sul do estado da Bahia, observou, que os erros eram maiores para as árvores cujo a altura h a ser estimada se encontrava mais próxima do *dap*. Souza et al. (2008b), também observaram o mesmo comportamento, em ajustes do Polinômio de 5º Grau, em árvores de um povoamento de *Pinus taeda* L, no estado de Santa Catarina.

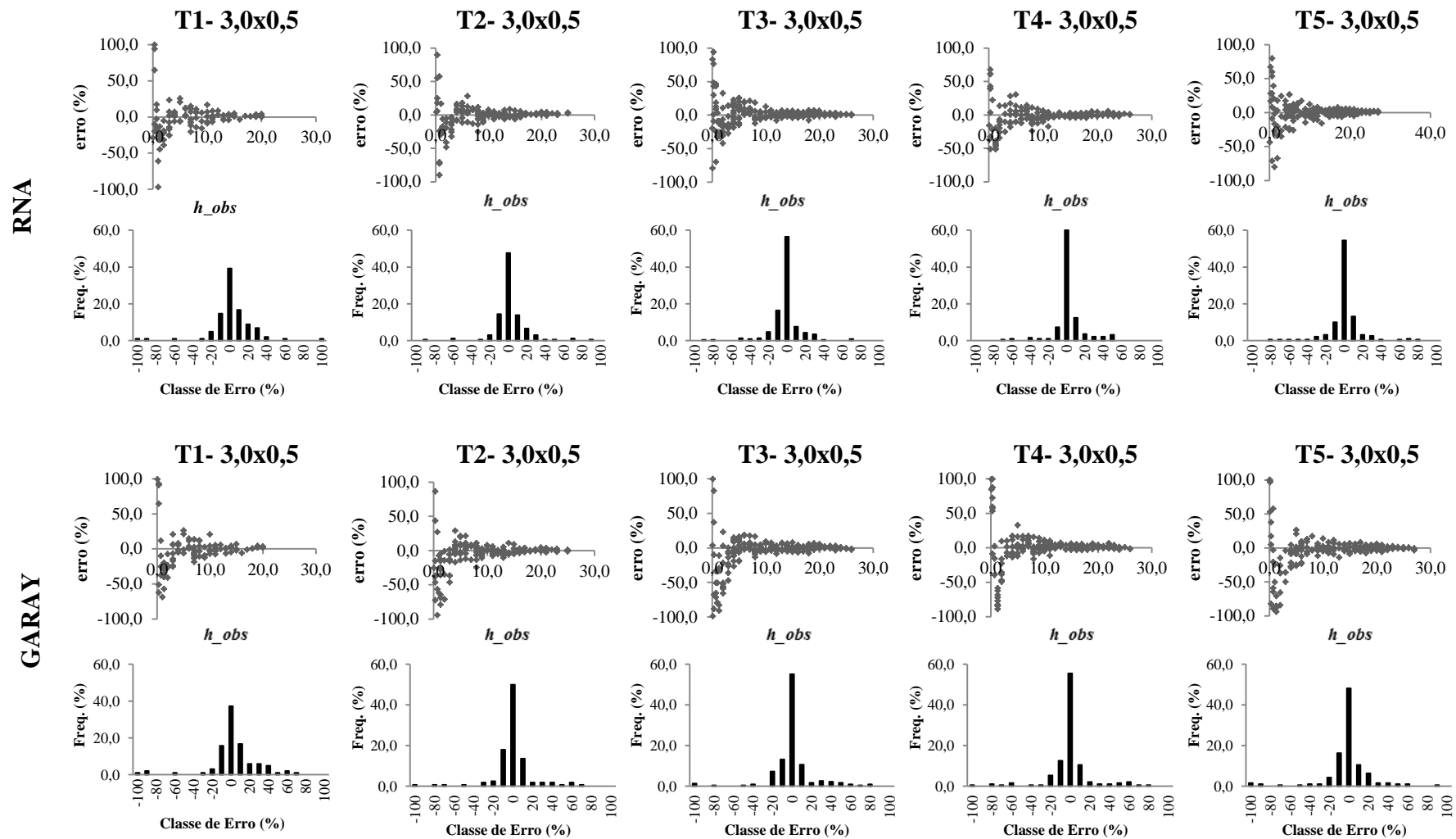


Figura 4: Dispersão dos resíduos percentuais em função dos valores das alturas a qualquer diâmetro especificado h observadas, e frequência percentual dos resíduos percentuais de h estimados, referentes às estimativas da RNA 6- h , e do modelo de Garay (1979), para cada um dos tratamentos em árvores de eucalipto em Itamarandiba-MG.

De maneira geral, as estimativas de h referentes à RNA apresentaram uma distribuição mais homogênea dos erros percentuais se comparado às estimativas do modelo de Garay em todos os tratamentos (Figura 4). Entretanto, a baixa precisão que geralmente ocorre nas estimativas de h não foi solucionada com a utilização das RNAs, mesmo buscando utilizar de diferentes combinações e um número maior de variáveis independentes relacionadas com o afilamento do fuste, como entradas para alimentar a rede.

As RNAs utilizadas neste estudo obtiveram resultados satisfatórios para as estimativas de todas as variáveis, apresentando precisão igual ou superior em relação ao modelo estatístico utilizado. Portanto, a escolha de qual técnica será utilizada vai depender da quantidade de dados disponível, que pode ser um fator limitante para utilização das RNA e do gerenciador.

5. CONCLUSÕES

A rede neural artificial estimou com precisão o afilamento dos fustes, distinguindo as variações na forma dos fustes em consequência dos diferentes arranjos espaciais.

A rede neural artificial estimou com precisão os diâmetros a qualquer altura especificada (d).

As estimativas das alturas a qualquer diâmetro especificado (h), obtidas pela RNA e pelo modelo de *taper* de Garay, apresentaram valores de erros percentuais acentuados na base dos fustes, em todos os arranjos espaciais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALEEIRO, G. B. **Modelagem neuro-fuzzy na estimativa de volume de *Eucalyptus* sp. Dissertação de Mestrado.** 2007. 51p. Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2007.
- BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações.** Livros Técnicos e Científicos (LTC). Rio de Janeiro. 2ª. ed. 2007. 226p.
- BINOTI, M. L. M. S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto.** 2010. 54p. Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.
- BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal.** 130p. Tese de Doutorado em Ciência Florestal - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.
- BRANDÃO, F. G. **Estimativa da altura total de *Eucalyptus* sp. utilizando lógica fuzzy e neuro fuzzy.** 2007. 50p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2007.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas.** 4 ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 605p.
- COELHO, L. S.; SILVA, W. V.; PROTIL, R. M. Previsão não linear dos preços de troncos de eucalipto baseada em uma abordagem neuroevolutiva. **Revista Gest. Prod.**, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 139-154, 2007.
- CYBENKO, G. Approximation by superpositions of a sigmoid function. **Mathematics of Control, Signals and Systems**, v. 2, p. 303–314, 1989.
- DIAMANTOPOULOU, M. J. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**. v. 2, p. 190-197, 2012.
- DIAMANTOPOULOU, M. J. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.48, n.3, p.235-244, 2005.
- DIAMANTOPOULOU, M. J. Predicting fir trees stem diameters using artificial neural network models. **Southern African Forestry Journal**. v. 205, n.1, p. 39-44, 2005.
- DIAMANTOPOULOU, M. J. Tree-bole volume estimation on standing Pine trees using cascade correlation artificial neural network models. **Agricultural Engineering International: The CIGR EJournal**, VIII, 2006.
- DIAMANTOPOULOU, M. J.; MILIOS, E. Modelling total volume of dominant Pine trees in reforestation via multivariate analysis and artificial neural network models. **Biosystems Engineering**. v. 105, n. 3, p. 306-315, 2010.

GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seattle. Coll. Forest. Resour., Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p.
(contrib. 36).

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; GLERIANI, J. M.. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 33, n. 6, p. 1141-1147, 2009.

HAUS, G. L. **Identificação de tráfego bitorrent com fins periciais utilizando Weka**. 57p. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2012.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e Práticas**. [S.l.]: Bookman, 2000.

LEITE, H. G.; SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; FARDIN, L.; TAKIZA, WA F. H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **Eur J Forest Res.**, v. 130, p. 263-269, 2011.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA-NETO, R. R.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M.; SILVA, M. L. M.; BINOTI,; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 053-059, 2011.

LEITE, H. G.; GAMA, J.V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (ROLL.) WARB. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 1, p. 99-106, 2006.
KOZAK, A., MUNRO, D. D., SMITH, J. H. G. Taper Function and their Applications in Forest Inventory. **For. Chron.**, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.

MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M.; KANGAS, A. The use of quantile três in the prediction of the diameter distribution of a stand. **Silva Fennica**, v. 40, n. 3, p. 501-516, 2006.

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

MOZER, C.; SMOLENSKY, P. **Skeletonization: A technique for trimming the fat from a network via relabance assessment**. In D. S. Touretzky, editor, *Advances in Neural Information Processing Systems 1*, pages 107-115. Iorgan Kaufmann, 1989.

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; BROOKS, J. R.; JR., H. V. W. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. **Journal of Environmental Management**. v. 91, n. 3, p. 742-753, 2010.

RUMELHART, D. E.; MCCLELLAND, J. L. **A general framework for parallel distributed processing**. in: *Parallel distributed processing: explorations*. In: *Learning internal representations by error propagation*. D. E. Rumelhart and J. L. McClelland (eds.). [S.l.]: MIT Press, 1986. p. 318-362.

SILVA, F.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 367-376, 2011.

SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de schumacher e hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

SOARES, F. A. A. M. N. **Predição recursiva de diâmetros de clones de eucalipto utilizando rede perceptron de múltiplas camadas para o cálculo de volume**. 2012. 131f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.

SOARES, F. A. A. M. N. Flôres, E. D.; Cabacinha, C. D.; Carrijo, G. A.; Veiga, A, C. P. Recursive diameter prediction and volume calculation of *Eucalyptus* trees using multilayer perceptron networks. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 78, p. 19-27, 2011.

SOARES, F. A. A. M. N. Flôres, E. D.; Cabacinha, C. D.; Carrijo, G. A.; Veiga, A, C. P. Recursive diameter prediction for calculating merchantable volume of *Eucalyptus* clones without previous knowledge of total tree height using artificial neural networks. **Applied Soft Computing**. v. 12 p. 2030-2039, 2012.

SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação**. 2009. 120f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 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. **Revista Ciência Rural**, v. 38, n. 9, 2008.

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B; SOUZA, A. L. Avaliação de modelos de afilamento não-segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **Revista Ciência Florestal**, UFSM-Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 393-405, 2008.

STATSOFT, INC. Statistica (data analysis software system), version 10. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>, 2010.

VALENTE, L. M, M. **A percepção da qualidade da informação na área de silvicultura da Klabin**. 114p. Dissertação mestrado em Ciência, Gestão e Tecnologia da Informação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2010.

WEKA. Weka 3 - Data Mining Open Source Machine Learning Software in Java. 2010. Acesso em: 01 abr. 2012. Disponível em: <<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>>.

XIAO, R.; CARANDE, R.; GHIGLIA, D. A neural network approach for tree height estimation using IFSAR Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.5, p. 345-348, 1998.

CAPÍTULO III

ESTUDO DA FORMA GEOMÉTRICA DE FUSTES DE EUCALIPTO EM DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTIO

RESUMO- O objetivo deste estudo foi de estudar a forma dos fustes em árvores de eucalipto em diferentes arranjos espaciais e idades, e de maneira específica, determinar as formas geométricas aproximadas, que ocorrem ao longo destes fustes e as suas proporções em relação à altura total. Foram utilizados dados de árvores conduzidas nos arranjos espaciais de 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, implantadas em dezembro de 2002, em Itamarandiba-MG. Foram utilizados também, dados de árvores provenientes de um sistema agroflorestal, plantio com 6,03 hectares, implantado em dezembro de 1993, no arranjo espacial de 10,0 x 4,0 m, de propriedade da empresa Votorantim Siderurgia. Utilizando a equação geral das curvas, buscou-se determinar a forma aproximada do sólido geométrico médio dos fustes e descrever as formas geométricas aproximadas que os fustes assumem ao longo de seu comprimento, determinar os seus pontos aproximados de inflexão e a proporção de cada forma em relação à altura total. Os fustes, nos arranjos de 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, apresentaram a forma média de um parabolóide, já os fustes no arranjo de 10,0 x 4,0 m, a forma média de um tronco de cone. Em média, os fustes nos arranjos espaciais 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide, um tronco de cone e um parabolóide, nas proporções de 10,96; 43,81 e 45,14 %, e de 14,58; 37,76 e 47,66 %, respectivamente, em relação à altura total. Os fustes referentes ao arranjo espacial 10,0 x 4,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide e de um tronco de cone, nas proporções de 20,78 e 79,30 %, respectivamente, em relação à altura total.

Palavras chave: Forma do fuste; Sólidos geométricos; Expoente de forma.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre o comportamento das formas dos fustes são importantes, porque as diferentes formas, além de afetarem o volume total, influenciam na qualidade e quantidade dos multiprodutos extraídos das árvores (FERREIRA, 1999).

Segundo Borges (1981), do ponto de vista dendrométrico, a forma do fuste de árvores, genericamente, é a sua configuração externa que, a rigor, não se identifica com a forma de um sólido geométrico específico, mas sim com várias formas, segundo a posição considerada no tronco. Chapman e Meyer (1949), Loetsch et al. (1973) e Husch et al. (1993), Husch et al., (2003), concluíram que a forma do tronco é basicamente descrita como um neilóide na base, um parabolóide no meio e um cone no topo. Row e Guttenberg (1966), Husch et al. (2003), verificaram que os fustes das árvores raramente apresentam uma forma exata e sim uma combinação das formas parabolóide, cone e neilóide. Estes sólidos podem ser obtidos rotacionando a curva gerada a partir de uma equação de forma em torno do seu eixo de rotação (Husch et al., 2003). Segundo Finger (1992), os sólidos são chamados de “protótipos dendrométricos” ou “sólidos padrões”, os quais são comparáveis à forma do tronco ou a partes deste.

O fuste das árvores apresentam formas bastante variáveis, modificando-se de acordo com a espécie e até mesmo dentro da mesma espécie. A forma varia de indivíduo para indivíduo, conforme as condições edafoclimáticas, os tratamentos silviculturais e a posição sociológica em que cada árvore se desenvolve. A forma também varia ao longo da idade, quer como um fenômeno evolutivo natural, ou como resultado das várias fases de competição relativas às árvores vizinhas (GOMES, 1957; LARSON, 1963; FINGER et al., 1995, citados por MÜLLER, 2004).

Müller (2004) verificou em seu estudo a forma média dos fustes, e as formas obtidas quando estes fustes eram divididos em seções, em relação à altura total, utilizando árvores de *Eucalyptus grandis*. Na ocasião, os fustes apresentaram a forma média entre um parabolóide e um cone, para diferentes classes diamétricas. Em relação às formas encontradas para as seções dos fustes, as porções superiores apresentaram a forma de uma parábola, ou de um tronco de cone, as três seções intermediárias foram classificadas apresentando formas parabólicas, com o aumento do gradiente parabólico da forma da seção à medida que se aproximava da base do fuste, e as seções referentes à base, apresentaram a forma de um tronco de neilóide.

Segundo Souza (2009), o fuste de uma árvore pode ter uma, duas, três e até mesmo quatro diferentes figuras ao longo de sua extensão. Os pontos de transição ou limites destes sólidos são de difícil determinação nos fustes. No entanto, desempenham um grande valor teórico na definição de expressões matemáticas que descrevem a forma do fuste (FIGUEIREDO FILHO et al., 1996).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi de estudar a forma dos fustes em árvores de eucalipto em diferentes arranjos espaciais e idades.

De maneira específica, determinar as formas geométricas aproximadas, que ocorrem ao longo destes fustes e as suas proporções em relação à altura total.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de árvores conduzidas em dois arranjos espaciais 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, implantadas em dezembro de 2002, localizados na Fazenda Campo Branco de propriedade da empresa Aperam Bioenergia, em Itamarandiba-MG. O material genético utilizado foi um clone de um híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*. Aos oito anos de idade foram abatidas 36 árvores em cada arranjo espacial. Em cada árvore abatida foram medidas além do *dap* e da altura total (*Ht*), os diâmetros com e sem casca nas seguintes alturas (*h*): 0,10; 0,30; 0,70; 1,00; 1,30 e 2,00 m, e a partir deste ponto em intervalos de 1,0 em 1,0 m, até a altura *h* onde $d = 4,0$ cm aproximadamente.

Foram utilizados também, dados de árvores provenientes de um talhão de sistema agroflorestal-SAF, com 6,03 hectares, implantado em dezembro de 1993, localizado na Fazenda Carrapato de propriedade da empresa Votorantim Siderurgia. O material genético utilizado foi um clone de *E. urophylla* no arranjo espacial de 10,0 x 4,0 m. Aos dezesseis anos de idade foram abatidas 46 árvores. Em cada árvore abatida foram medidas além do *dap* e da altura total (*Ht*), os diâmetros com e sem casca nas seguintes alturas (*h*): 0,10; 0,50; 1,00 e 2,00 m, e a partir deste ponto em intervalos de 2,0 em 2,0 m, até a altura *h* onde $d = 4,0$ cm aproximadamente.

Os arranjos espaciais 3,0 x 0,5; 3,0 x 3,0 e 10,0 x 4,0 m, foram denominados como P1, P2 e P3, respectivamente.

A equação (1), descrita por Newnham (1988), foi utilizada para descrever a variação na forma dos fustes em todas as árvores referentes a cada um dos conjuntos de dados. As posições ao longo dos fustes onde foram calculados os valores do expoente f se referem às mesmas posições da cubagem, exceto a 1,30 metros.

$$\bullet Y^f = X \quad (1)$$

Em que: Y é o diâmetro a qualquer altura especificada; X é a altura a qualquer diâmetro especificado; e f é o expoente de forma, que neste caso se transpõe para:

$$f = \frac{\ln((Ht-h)/(Ht-1,3))}{\ln(d/dap)} \quad (2)$$

Onde: Ht é a altura total da árvore; d se refere ao diâmetro na altura h ao longo do fuste, e dap o diâmetro à altura do peito. Esta equação assume a contínua variação da forma ao longo do fuste, e permite estimar valores de f em qualquer ponto do fuste, exceto na altura onde X e Y são iguais. Para valores de $f \approx 0,66$, $f \approx 1$ e $f \approx 2$, a região do fuste assume as formas de um tronco de neilóide, um tronco de cone e de um parabolóide, respectivamente.

O modelo de Garay (1979) foi ajustado na sua forma original para cada um dos arranjos espaciais (Equação 3). Os ajustes foram realizados a partir de análises de regressão utilizando o método iterativo Gauss-Newton, no *software* Estatística 10.0 (STATSOFT, 2010).

Foram selecionadas as árvores de diâmetro mínimo ($d_{min.}$), diâmetro médio (q) e de diâmetro máximo ($d_{max.}$) em cada um dos conjuntos de dados (P1, P2 e P3). Em seguida foram estimados diâmetros com casca (d) ao longo destes fustes (Equação 3), partido da base, na altura $h = 0,10$ m, e a partir deste ponto prosseguindo em intervalos de 0,10 em 0,10 m, até o diâmetro comercial onde $d = 4,0$ cm, conforme esquema da Figura 1.

Modelo de Garay (1979):

$$\frac{d}{dap} = \beta_0(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (3)$$

$$\hat{d} = dap\beta_0(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (4)$$

em que:

- d = diâmetro com casca na altura h (cm);
- dap = diâmetro com casca (cm), a altura do peito (1,30 m);
- h = distância do solo (m) até o ponto onde o diâmetro d é considerado;
- Ht = altura total (m);
- β_k = parâmetros da regressão ($k = 0,1,2,3$); e
- ε = erro aleatório, sendo $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

Os diâmetros estimados ao longo dos fustes foram utilizados posteriormente nos ajustes da equação geral das curvas (Equação 5). Onde, primeiramente buscou-se determinar a forma média aproximada do sólido que os fustes podem assumir, determinando um valor de coeficiente r médio para cada fuste, conforme o esquema da Figura 1. Estes ajustes foram realizados a partir de análises de regressão utilizando o método iterativo Gauss-Newton, no *software* Estatística 10.0 (STATSOFT, 2010).

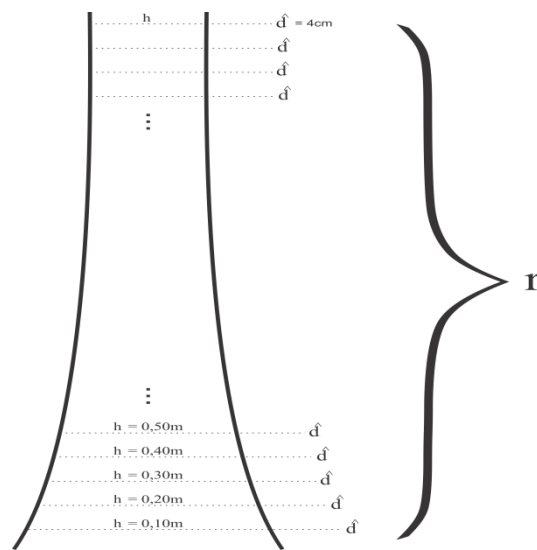


Figura 1: Esquema ilustrativo de como foram realizadas as estimativas dos diâmetros d ao longo dos fustes pelo modelo de Garay e de como as estimativas destes diâmetros foram utilizadas para estimar o expoente r pela equação geral das curvas.

Na tentativa de descrever as formas aproximadas que os fustes assumem ao longo de seu comprimento, procedeu-se com os ajustes da equação geral das curvas (Equação 5) da seguinte maneira: a partir dos três primeiros diâmetros (d) estimados e as suas respectivas alturas (h), foi feito o primeiro ajuste, em seguida, acrescentou-se aos três pares de dados do ajuste anterior, o próximo par de pontos acima, referente ao diâmetro (d) na altura

$h = 0,40$ m, e assim procedeu-se da mesma maneira, sempre somando o par de pontos acima para o próximo ajuste, até o diâmetro predeterminado, onde $d = 2,0$ cm, conforme o esquema da Figura 2. Os ajustes foram realizados a partir de programação computacional em ambiente MatLab, por se tratar de um elevado número de ajustes, e da maneira como eles foram realizados ao longo de cada fuste.

Equação geral das curvas:

$$y = bx^r, \quad b \neq 0 \quad (5)$$

Em que, y representa o raio da seção transversal em centímetros, ou seja, os valores dos diâmetros com casca estimados, divididos por dois ($d^{cc}/2$); b é um parâmetro do modelo, que determina o afinamento de uma forma específica; x é a distância em metros, entre o topo do fuste e a posição (h) da seção transversal (y) ao longo do fuste ($x = Ht-h$), e r é o parâmetro de forma que determina a maneira com que o perfil se estreita.

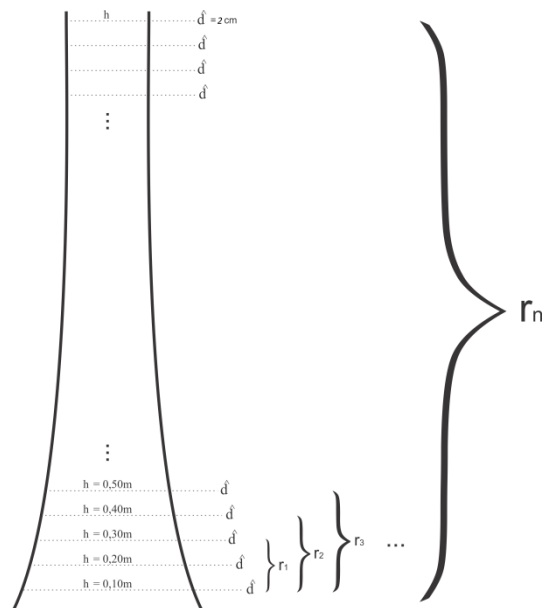


Figura 2: Esquema ilustrativo de como foram realizadas as estimativas dos expoentes de forma (r) ao longo dos fustes pela equação geral das curvas.

De acordo com Lehmann (1987), a constante arbitrária ou parâmetro r representa uma família de curvas denominadas curvas de potência. As curvas dessa família são do tipo parabólico se r é positivo, e são do tipo hiperbólico se r é negativo. Considerando as curvas de potência parabólicas, para $r = 0$ e 1 , temos linhas retas; para $r = 2$, uma parábola; para $r = \frac{1}{2}$,

um ramo de uma parábola; para $r = 3$, a parábola cúbica; para $r = \frac{2}{3}$, uma parábola semicúbica e para $r = \frac{3}{2}$, um ramo de uma parábola semicúbica. Analogamente aos valores citados anteriormente e considerando o expoente r positivo, quando se trata das formas que um fuste pode assumir os sólidos geométricos são então classificados conforme Husch et al., (2003) e Campos e Leite (2013) da seguinte maneira: para $r=0$, um cilindro; $r = \frac{1}{2}$, um parabolóide; $r=1$, um cone; e para $r = \frac{3}{2}$, um neilóide.

De posse dos valores do coeficiente r estimados ao longo de cada fuste, buscou-se estabelecer a posição onde cada forma predomina, seus pontos aproximados de inflexão e suas proporções em relação à altura total dos fustes, para os fustes de diâmetros mínimos, médios e máximos de cada arranjo espacial, buscando descrever o comportamento da forma dos fustes em relação às diferentes densidades de plantio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3, mostra a variação na forma dos fustes em função da altura h para cada um dos arranjos espaciais, a partir do coeficiente de forma de Newnham (1988).

Ocorreram diferenças acentuadas nas formas, principalmente em relação aos arranjos mais adensados P1 e P2, quando comparados com P3. Os fustes referentes à P1 apresentam a forma de um tronco de neilóide na base ($f \approx 0,66$), até aproximadamente um metro de altura. Em P2, também houve esta mesma tendência até um metro da altura, porém, os valores de f foram menores ($f \approx 0,4$), indicando a forma de um tronco de neilóide mais acentuado nesta região (Figura 3).

Os fustes de P1 e P2 apresentaram uma mudança mais abrupta na forma nas regiões próximas a um metro de altura, com $f \approx 1$, até aproximadamente os três metros de altura, indicando a forma de um tronco de cone. A mudança da forma cônica para a forma mais próxima de um parabolóide $f \approx 1,5$, também ocorreu de forma mais abrupta na região entre os cinco e seis metros de altura, seguida de um leve decréscimo, e em seguida, aumentando gradativamente à medida que foi se aproximando do topo dos fustes, apresentando valores de $f \approx 1,8$ em P1, e $f \approx 1,5$ em P2 (Figura 3).

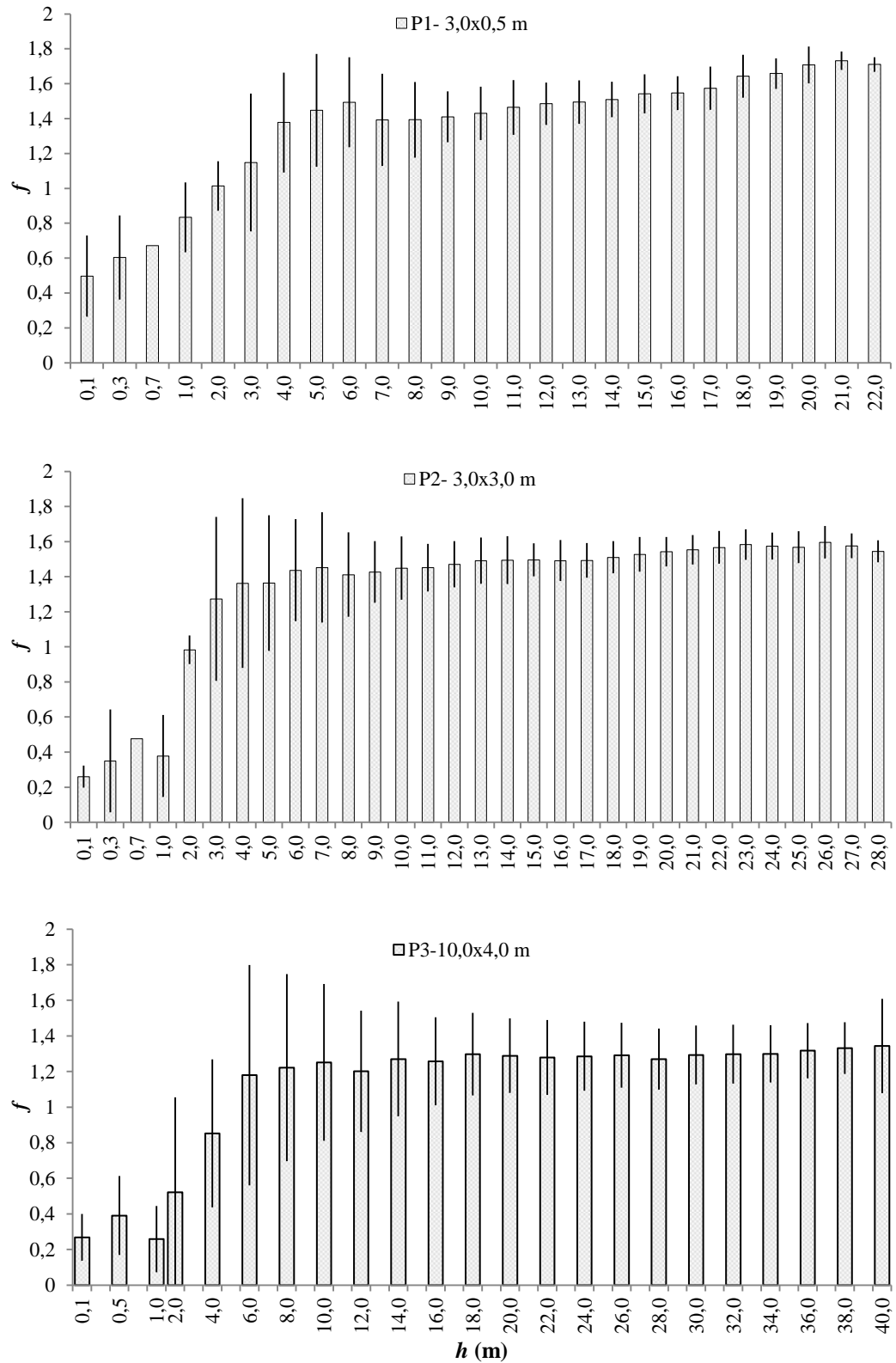


Figura 3: Mudança na forma em relação à altura do fuste, descrita a partir do expoente de forma de Newnham (f) em árvores de eucalipto em diferentes arranjos espaciais. Valores referentes às médias de f em função das posições h em metros, as linhas na parte superior das barras se referem aos desvios padrão das médias.

Os fustes de P3 assumiram a forma de um neilóide bem acentuado na base $f \approx 0,4$, até aproximadamente a altura de três metros. Nestes fustes, ocorreram mudanças menos abruptas na forma, com valores de $f \approx 1$, aproximadamente dos cinco até os doze metros e, em seguida, assumindo a forma de um tronco de cone mais acentuado com $f \approx 1,3$, se mantendo até o topo (Figura 3). Portanto, os fustes de P3 não assumiram a forma de um parabolóide em momento algum.

Mesmo sendo de difícil identificação os pontos de inflexão das formas geométricas o coeficiente de forma de Newnham conseguiu identificar as principais formas geométricas assumidas ao longo dos fustes e distinguir as variações na forma dos fustes em resposta à variação dos arranjos espaciais e da idade. Comparativamente, os fustes de P1, apresentaram formas mais cilíndricas que os fustes de P2, e estes, por sua vez, são mais cilíndricos que os fustes de P3 (Figura 3).

Pinkard e Neilsen (2003), utilizando o coeficiente de forma f em dois povoamentos de *Eucalyptus nitens*, conduzidos nos arranjos espaciais de 3,0 x 2,0 m e 5,0 x 4,0 m, aos sete anos de idade, no norte da Tasmânia, encontraram uma mesma sequência de formas ao longo dos fustes, e também valores do expoente de forma f bem próximos aos encontrados neste estudo.

São apresentados na Tabela 1, os parâmetros referentes aos ajustes do modelo de Garay e os coeficientes de correlações entre os valores observados e estimados ($r_{\hat{Y}Y}$) para cada equação, referente aos três arranjos espaciais. Todos os ajustes apresentaram valores de coeficiente de correlação satisfatórios, superiores a 0,9800, e também satisfatórias dispersão dos resíduos em função dos valores de d/dap observados (Figura 4A).

Tabela 1: Parâmetros referentes aos ajustes das equações do modelo de Garay (1979), e os coeficientes de correlação ($r_{\hat{Y}Y}$), referentes a cada um dos conjuntos de dados

Povoamentos	Arranjo espacial	Parâmetros				$r_{\hat{Y}Y}$
		β_0	β_1	β_2	β_3	
P1	3,0 x 0,5	1,16154677	0,47381482	0,84661816	0,47650518	0,9906
P2	3,0 x 3,0	1,21019972	0,31852946	0,95020263	0,30514918	0,9924
P3	10,0 x 4,0	1,24042547	0,31087899	0,96248408	0,23876232	0,9811

Onde: β_K são os parâmetros da regressão.

Foram sugeridos intervalos para os valores dos quais o expoente r pode assumir em consequência da variação da forma do sólido geométrico aproximado encontrado nos fustes, definindo uma classificação para o expoente r , sendo eles considerados como os valores dos pontos de inflexões para cada sólido geométrico neste trabalho (Tabela 2).

Tabela 2: Intervalos de valores do expoente r , preestabelecidos de acordo com a forma aproximada de cada sólido geométrico que um fuste possa vir a assumir

Intervalos de r			Sólidos aproximados
0,00	$\leq r \leq$	0,25*	Cilindro
0,25	$< r \leq$	0,75*	Parabolóide
0,75	$< r \leq$	1,25*	Tronco de Cone
-	$r >$	1,25*	Tronco de Neilóide

Onde: r é o expoente de forma referente à equação geral das curvas; * valores considerados como pontos de inflexões de cada sólido geométrico nos fustes.

Na Tabela 3, são apresentados os valores de dap e de altura total observados, referentes às árvores de diâmetro mínimo ($d_{min.}$), diâmetro médio (q) e de diâmetro máximo ($d_{max.}$) selecionadas em cada arranjo espacial. São apresentados também os valores referentes aos expoentes r estimados, que representam a forma do sólido geométrico médio de cada fuste.

Os valores referentes à forma do sólido médio, encontrados para os fustes de menor porte, P1 e P2, ficaram entre 0,6372 e 0,6614 (Tabela 3). A partir da classificação utilizada neste estudo (Tabela 2) os referidos fustes apresentam a forma um parabolóide. Müller (2004), estudou o expoente de forma médio em árvores de *Eucalyptus grandis* no Rio Grande do Sul, encontrou para um conjunto de árvores com o dap inferior a 20 cm, implantadas no arranjo de 3,0 x 2,0 metros, e que posteriormente sofreram desbastes, remanescendo aos 15 anos, aproximadamente 200 árvores por hectare, classificando na ocasião a forma destes fustes entre um parabolóide e um cone.

Os fustes referentes às árvores de maior porte P3 apresentaram valores de forma média para os fustes entre 0,7774 e 0,7911, sugerindo a forma de um tronco cone. Müller (2004), classificou dois conjuntos de árvores, um com árvores de dap entre 20 e 30 cm, e o outro com árvores com dap superiores a 30 cm, ambos apresentando as formas entre parabolóide e cone.

Müller (2004), em seu trabalho, observou também, que os valores de r para as formas médias apresentaram uma maior variação nas árvores menores que 20 cm de dap . Também observada neste estudo, principalmente nos fustes referentes à P1. No fuste de $d_{min.}$, o valor de r indicou que o referido fuste apresenta uma forma parabólica mais acentuada que os outros fustes do mesmo grupo, e dos fustes referentes à P2 (Tabela 3), isso provavelmente ocorreu devido a menor dimensão do fuste em diâmetro e em altura em relação as demais.

Tabela 3: Valores do expoente da forma médio (r) por fuste, referentes às árvores de eucalipto selecionadas em cada conjunto de dados, em Itamarandiba-MG

Povoamentos	Arranjo espacial	Árvore	dap (cm)	Ht (m)	r
P1	3,0 x 0,5	$d_{min.}$	4,6	10,5	0,6614
		q	8,8	18,7	0,6413
		$d_{max.}$	12,5	25,4	0,6504
P2	3,0 x 3,0	$d_{min.}$	11,3	21,2	0,6372
		q	15,9	27,8	0,6595
		$d_{max.}$	19,4	28,0	0,6595
P3	10,0 x 4,0	$d_{min.}$	23,5	32,5	0,7787
		q	33,0	39,4	0,7774
		$d_{max.}$	43,0	44,2	0,7911

Onde: P1, P2 e P3 são referentes a cada um dos conjuntos de dados; dap = diâmetro à altura do peito; Ht = altura total e $d_{min.}$; q ; $d_{max.}$ são referentes às árvores de diâmetro mínimo, médio e máximo.

Müller (2004), ainda afirmou em relação aos valores das formas médias, que, qualquer r aumenta com o crescimento da classe de diâmetro, corroborando com os valores encontrados neste estudo. Os valores de r aumentaram à medida que as árvores apresentaram maiores diâmetros, houve pouca variação entre P1 e P2, entretanto, se compararmos estes dois com P3 a diferença foi mais pronunciada (Tabela 3). Os fustes em P3 tenderam para formas médias mais cônicas que os fustes de P1 e P2, confirmando a relação já bem conhecida, para árvores conduzidos em espaçamentos mais reduzidos apresentam fustes com uma forma média mais cilíndrica que aqueles conduzidos em espaçamentos mais amplos (LARSON, 1963; FRIEDL, 1989; ASSMANN, 1970; BALLONI, 1983 e OPIE et al., 1984, citados por SCHONAU e COETZEE, 1989; KRAMER, 1988; STERBA, 1988; BALDWIN et al., 2000; NOGUEIRA et al., 2008; RANCE et al., 2012).

A posição onde se encontra cada forma geométrica aproximada e as suas proporções nos fustes em relação à altura total, referentes às árvores de diâmetro mínimo ($d_{min.}$), médio (q) e máximo ($d_{max.}$) de cada arranjo espacial, são apresentados na Tabela 4. Para a classificação das formas e seus pontos de inflexão foram considerados os intervalos de valores do expoente de forma (r) descritos na Tabela 2.

Nas porções basais dos fustes referentes à região com a forma de um tronco de neilóide ($r > 1,25$), os pontos de inflexões foram de $h= 0$ metros até 1,10; 2,10 e 3,00 metros em P1, de $h= 0$ metros até 3,10; 4,10 e 4,20 metros em P2, e de $h= 0$ metros até 6,70; 8,20 e 9,20 metros em P3, para as árvores de $d_{min.}$, q e $d_{max.}$, respectivamente (Tabela 4).

Os pontos de inflexões e, conseqüentemente, as proporções da forma geométrica tronco de neilóide aumentou na medida em que o *dap* dos fustes aumentou, tanto para os fustes de um mesmo arranjo espacial quanto de um arranjo para o outro (Tabela 4, Figura 4).

Nas porções dos fustes com a forma de um tronco de cone ($0,75 < r \leq 1,25$), os pontos de inflexões foram dos pontos onde os fustes deixaram a forma de um tronco de neilóide até as alturas *h* de 5,70; 10,30 e 14,10 metros em P1, em P2, até as alturas *h* de 11,20; 14,60 e 14,70 metros, e em P3 até o topo onde *d* = 2,0 cm, para as árvores de *d_{min.}*, *q* e *d_{max.}*, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4: Pontos de inflexão e as proporções da forma dos sólidos em relação à altura total dos fustes para cada um dos conjuntos de dados, em árvores de eucalipto em Itamarandiba-MG

Povoamento	Arranjo espacial	Árvore	Forma	<i>h</i> (m)	<i>f</i> / <i>Ht</i> (%)
P1	3,0 x 0,5	<i>d_{min.}</i>	Neilóide	1,10	10,00
			Cone	5,70	43,79
			Parabolóide	10,50	46,21
		<i>q</i>	Neilóide	2,10	10,96
			Cone	10,30	43,81
			Parabolóide	18,70	45,14
		<i>d_{max.}</i>	Neilóide	3,00	11,65
			Cone	14,10	43,68
			Parabolóide	25,40	44,66
P2	3,0 x 3,0	<i>d_{min.}</i>	Neilóide	3,10	14,40
			Cone	11,20	38,19
			Parabolóide	21,20	47,41
		<i>q</i>	Neilóide	4,10	14,58
			Cone	14,60	37,76
			Parabolóide	27,80	47,66
		<i>d_{max.}</i>	Neilóide	4,20	14,84
			Cone	14,70	37,48
			Parabolóide	28,00	47,67
P3	10,0 x 4,0	<i>d_{min.}</i>	Neilóide	6,70	20,48
			Cone	32,50	79,52
			Parabolóide	-	0
		<i>q</i>	Neilóide	8,20	20,70
			Cone	39,4	79,30
			Parabolóide	-	0
		<i>d_{max.}</i>	Neilóide	9,20	20,71
			Cone	44,20	79,29
			Parabolóide	-	0

Onde: P1, P2 e P3 = são referentes aos conjuntos de dados; *d_{min.}*, *q* e *d_{max.}* = são referentes às árvores de diâmetro mínimo, médio e máximo; *h* = referente à altura relativa do limite de cada forma no fuste; *f* / *Ht* = referente o quanto cada forma ocupa em relação à altura total em cada fuste, em porcentagem.

Os pontos de inflexões da forma geométrica tronco de cone aumentaram na medida em que o *dap* dos fustes aumentou, tanto para os fustes de um mesmo arranjo espacial quanto de um arranjo para o outro. Entretanto, as proporções reduziram de P1 para P2, e em P3 aumentaram consideravelmente (Tabela 4, Figura 4).

Nos fustes que apresentam a forma geométrica de um parabolóide ($0,25 < r \leq 0,75$), os pontos de inflexões foram de onde terminaram a forma de um tronco de cone até o topo, para as árvores de $d_{min.}$, q e $d_{max.}$ nos arranjos espaciais P1 e P2. Os fustes referentes à P3 não assumiram a forma de um parabolóide em momento algum. A forma de parabolóide tendeu a aumentar sua proporção de P1 para P2, e apresentou a maior proporção quando comparada as outras duas formas geométricas (Tabela 4, Figura 4).

Müller (2004) avaliando o expoente de forma em árvores de *Eucalyptus grandis* no Rio Grande do Sul, implantadas no arranjo de 3,0 x 2,0 m, e que posteriormente sofreram desbastes, remanescendo aos 15 anos, aproximadamente 200 árvores por hectare. Seccionando os fustes em quatro partes a 20,0; 40,0; 60,0 e 80,0 % em relação à altura total, no sentido do topo para a base. O autor encontrou para o conjunto de árvores com o *dap* inferior a 20 cm, nas seções referentes aos 60,0 % iniciais no topo dos fustes, a forma de uma parábola quadrática, corroborando em parte com os valores encontrados para P1 e P2. Na parte central dos fustes, representada pelas porções entre 60,0 e 80,0 % dos fustes, classificou as seções como uma parábola quadrática e um tronco de cone, sendo mais próxima de uma parábola quadrática. Diferentemente da classificação para os fustes de P1 e P2, neste estudo, que apresentaram nesta região, a forma de um tronco de cone. Na parte inferior dos fustes, representada pela porção entre 80,0 % da altura até a base, Müller (2004), classificou as seções como um tronco de neilóide, corroborando com a forma encontrada na base dos fustes de P1 e P2. Entretanto, a forma do tronco de neilóide provavelmente não assumiu a proporção nos fustes até os 20,0 % da altura total.

Para o conjunto de árvores referentes à classe superior a 30 cm de *dap*, Müller (2004), classificou a parte referente os 20,0 % iniciais no topo do fuste, sendo mais próxima da forma de um tronco de cone. Nas porções do tronco entre 20,0 e 80,0 %, da altura, o autor classificou esta região sendo mais próxima de uma parábola quadrática. Resultados que não corroboram com os encontrados neste estudo para os fustes referentes à P3, classificando toda esta região como um tronco de cone. Na parte referente à porção entre 80,0 % da altura e a base, classificou as seções como um neilóide, corroborando com a forma encontrada na base para os fustes de P3, neste estudo (Tabela 4).

Com o seccionamento dos fustes obtém-se um valor médio para o expoente da referida seção, indicando que a seção trata-se de uma forma geométrica pura, onde pode estar ocorrendo uma mistura de duas formas geométricas distintas. Quando avaliado as formas ao longo dos fustes sem seccioná-los é possível determinar com maior precisão as proporções que cada forma ocupa.

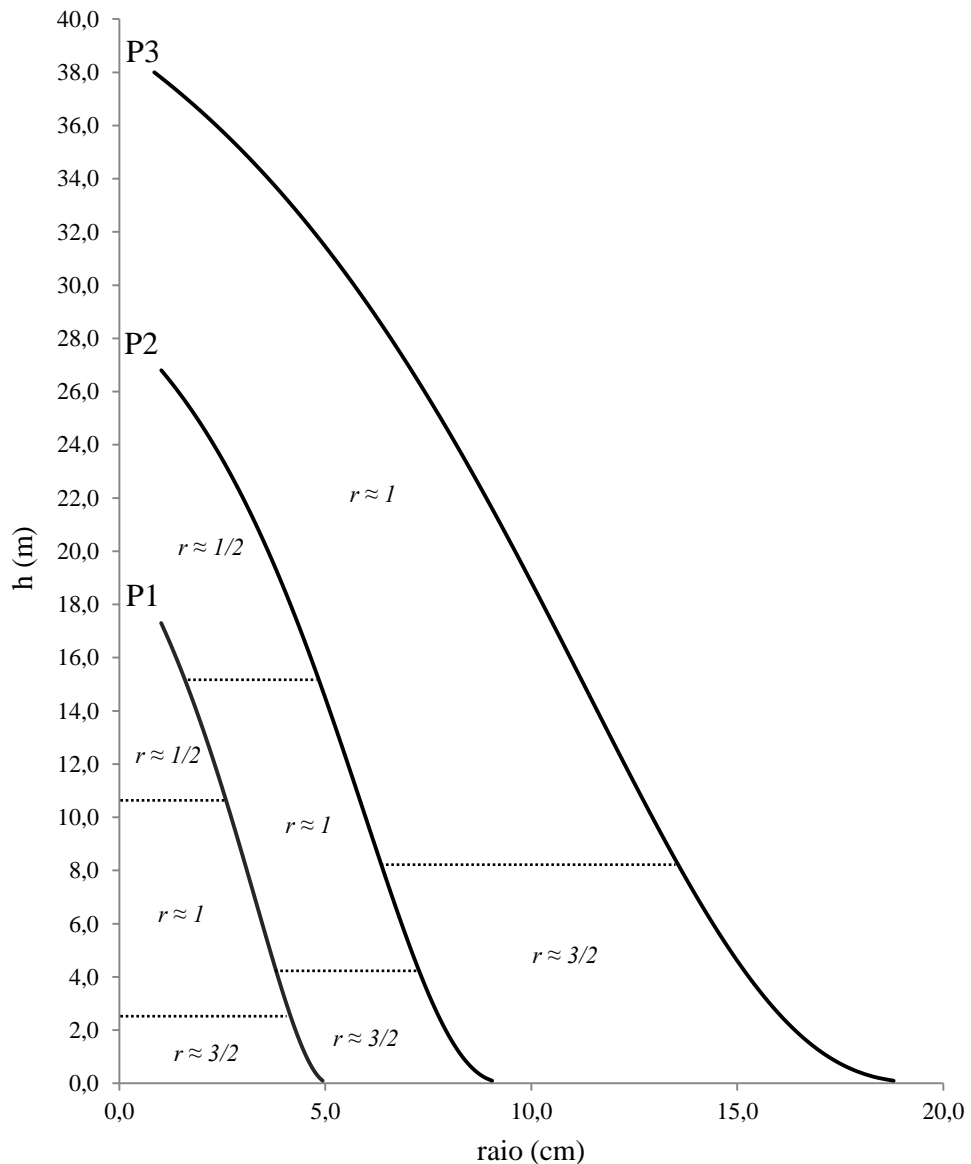


Figura 4: Perfis referentes às árvores médias (q) de P1- 3,0 x0,5, P2- 3,0x3,0 e P3- 10,0x4,0 m, onde as linhas na horizontal representam os pontos de inflexões que delimitam as regiões referentes a cada forma ao longo dos fustes, assinaladas pelo valor do expoente característico de cada forma aproximada. Valores de $r \approx 1/2$, 1 e $3/2$, são referentes às formas dos sólidos parabolóide, tronco de cone e tronco de neilóide, respectivamente.

Avaliando os fustes referentes à P3, em relação a P1 e P2, observa-se que, árvores conduzidas com pouca ou com a ausência de competição e com uma idade mais avançada, os

fustes assumem formas muito distintas de fustes de árvores conduzidas em arranjos espaciais reduzidos ou convencionais. Os fustes de P3 não assumiram a forma geométrica de um parabolóide como observado em P1 e P2, e tiveram um aumento considerável para a forma do tronco de cone, ocupando a posição no fuste da forma parabolóide (Tabela 4, Figura 4).

O aumento da proporção da forma geométrica tronco de neilóide na base faz com que os fustes tenham uma forma mais afilada, se tornem mais cônicos (Tabela 4, Figura 4). Por este motivo, que os fustes em P1 apresentam um valor de expoente de forma médio menor que os fustes de P2, o mesmo ocorre, quando comparamos os valores do expoente de forma médio de P1 e P2 com P3, como verificado na Tabela 2.

Finger (1992), afirmou que, o estudo matemático dos volumes das árvores considera suas secções circulares mesmo sabendo que elas não são perfeitamente circulares. A utilização desta metodologia pode auxiliar na escolha de equações e ou formas matemáticas específicas para o cálculo do volume total ou de secções dos fustes, que venham a considerar a forma geométrica aproximada de cada região do fuste.

Os pontos de inflexão das formas geométricas encontrados neste trabalho, não são exatos e podem sofrer alterações devido à qualidade dos ajustes das equações de *taper* e da equação geral das curvas. A mudança no critério de escolha dos intervalos do expoente de forma r , onde cada forma é definida, também pode ocasionar em diferenças nos pontos de inflexão e conseqüentemente nas proporções.

Os fustes de eucalipto avaliados, apresentam uma seqüência de formas no sentido base-topo de: um tronco de neilóide, um tronco de cone e um parabolóide, para P1 e P2, e de um tronco de neilóide e de um tronco de cone, para P3, diferentemente da seqüência descrita por Müller (2004) para *Eucalyptus grandis*, e de Chapman e Meyer (1949), Loetsch et al. (1973) e Husch et al. (1993; 2003) para coníferas.

5. CONCLUSÕES

Os fustes de eucalipto nos arranjos espaciais de 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide na base, passando para a forma de um tronco cone, e em seguida, assumem a forma de um parabolóide, até o topo.

Os fustes de eucalipto no arranjo espacial 10,0 x 4,0 m, assumem na base a forma de um tronco de neilóide, e em seguida, assumem a forma de um tronco cone até o topo.

Em média, os fustes nos arranjos espaciais 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide, um tronco de cone e de um parabolóide, nas proporções de 10,96; 43,81 e 45,14 %, e de 14,58; 37,76 e 47,66 %, respectivamente, em relação à altura total.

Em média, os fustes referentes ao arranjo espacial 10,0 x 4,0 m, assumem as formas de um tronco de neilóide e de um tronco de cone, nas proporções de 20,78 e 79,30 %, respectivamente, em relação à altura total.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSMANN, E. **The principles of forest yeild study**. Oxford: Pergamon press, 1970. 506p.
- BALDWIN JR., V. C. et al. 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.
- BORGES, J.F. **Seccionamento do fuste de *Pinus taeda* L. para obtenção do volume de madeira serrada através da função polinomial**. 1981. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1981.
- CHAPMAN, H. H.; MEYER, W. H. **Forest Mensuration**. New York: McGraw-Hill, 1949. 522p.
- FERREIRA, S. O. **Estudo da forma do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana***. 1999. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 1999.
- FIGUEIREDO FILHO, A. BORDERS, B. E; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* in Southern Brasil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 83, p. 39-46, 1996.
- FINGER, C.A.G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria:UFSM, CEPEF - FATEC, 1992. 269p.
- FRIEDL, R.A. **Dinâmica de forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 1989. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1989.
- GARAY, L. **Tropical forest utilization system**. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. *Seatlhe. Coll. Forest. Resour., Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64p. (contrib. 36).*
- 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**. 3. ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993. 402p.
- KRAMER, H. **Waldwachstumslehre**. Hamburg: Paul Parey, 1988. 374p.
- LARSON, P. R. Stern from development of forest tree. **Forest Science Monograph**. Washington, p. 1-41, 1963.
- LEHMANN, C. H. **Geometria analítica**. Tradução Ruy Pinto da Silva Sieczkowisk. 6ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.
- LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory Bern, Verlagsgesellschaft München**, 1973. v. 2. 469p.

MÜLLER, I. **Forma de tronco e sortimentos de madeira para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., manejado em alto fuste, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul.** 2004. 166f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

NEWNHAM, R.M. A variable-form taper function. **Report number PI-X-83.** Petawawa national Forestry Institute, 1988.

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.

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.

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.

ROW, C.; GUTTENBERG, S. Determining weight-volume relationship for saw logs. **For Prod. Journ.**, v. 16, n. 5, p. 39-47. 1966.

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

SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação.** 2009. 120f. Tese de Doutorado 120p. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2009.

STATSOFT, INC. Statistica (data analysis software system), version 10. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>, 2010.

STERBA, H. **Vorlesungsunterlagen zur Forstlichen Ertragslehre.** Wen Univ. F. Bodenkultur. 1988. 150p. (unpublished).

CONCLUSÕES GERAIS

O modelo de Garay (1979) apresenta ajustes satisfatórios e uma grande capacidade em descrever as pequenas variações na forma dos fustes, em resposta às variações na densidade de plantio.

O modelo de Shöepfer (1966), por ser de um grau muito elevado perde o realismo biológico, portanto, não é indicado a sua utilização com o objetivo em descrever a forma dos fustes.

A rede neural artificial selecionada para estimar o afilamento dos fustes, estimou com precisão, distinguindo as variações na forma dos fustes em consequência dos diferentes arranjos espaciais.

As RNAs utilizadas neste estudo obtiveram resultados satisfatórios para as estimativas de todas as variáveis, apresentando precisão igual ou superior em relação ao modelo estatístico utilizado. Portanto, a escolha de qual técnica será utilizada vai depender da quantidade de dados disponível, que pode ser um fator limitante para utilização das RNA e do manejador.

Com a utilização dos coeficientes de forma média (r) foi possível avaliar o a variação na forma dos fustes em relação aos diferentes arranjos espaciais.

Os fustes de eucalipto conduzidos nos arranjos espaciais 3,0 x 0,5 e 3,0 x 3,0 m assumem as formas de um tronco de neilóide na base, passando para a forma de um tronco cone, e em seguida, assumem a forma de um parabolóide, até o topo.

Os fustes de eucalipto no arranjo espacial 10,0 x 4,0 m assumem na base a forma de um tronco de neilóide, e em seguida, assumem a forma de um tronco cone até o topo.

O aumento da proporção da forma geométrica tronco de neilóide na base faz com que os fustes tenham uma forma mais afilada.

O estudo do afilamento dos fustes e a utilização dos modelos de *taper* não devem ser restritos às árvores de grande porte que geralmente são destinadas para fins mais nobres, a aplicação destes estudos e a sua posterior utilização em povoamentos com árvores de menor porte também se faz necessário, buscando um melhor aproveitamento da madeira de modo a gerar um maior rendimento econômico da floresta, principalmente na ocasião de uso múltiplo.

APÊNDICE

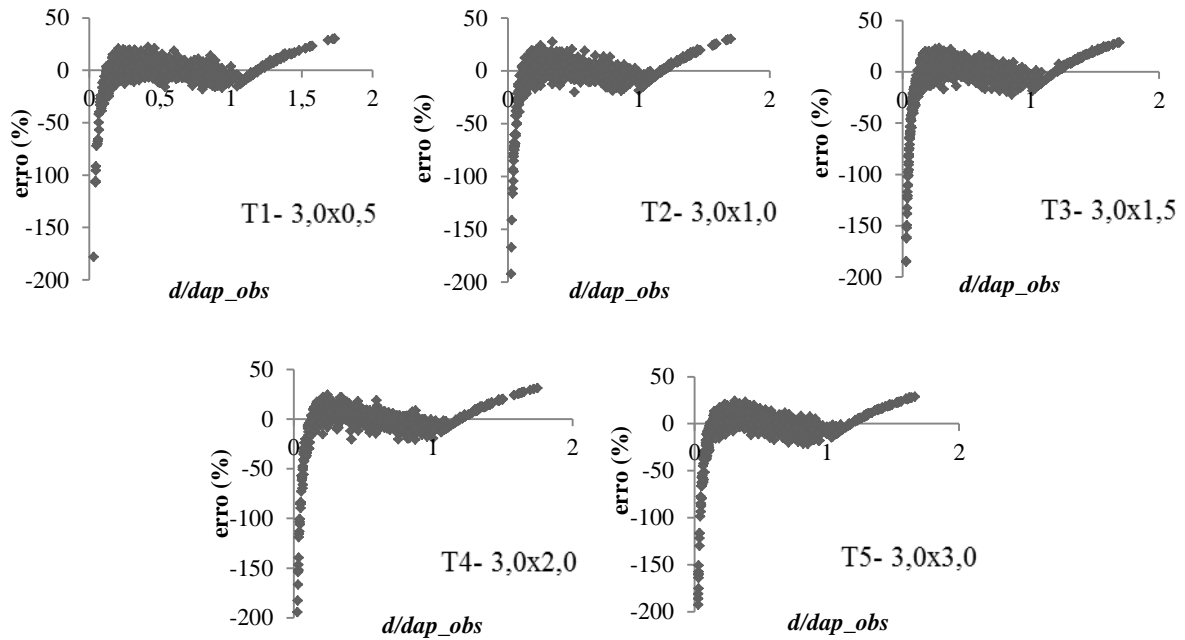


Figura 1A: Valores de d/dap observados em função de seus correspondentes valores de erros estimados em porcentagem, referentes aos ajustes do modelo de Kozak (1969), em árvores de eucalipto conduzidas em diferentes arranjos espaciais, Itamarandiba-MG.

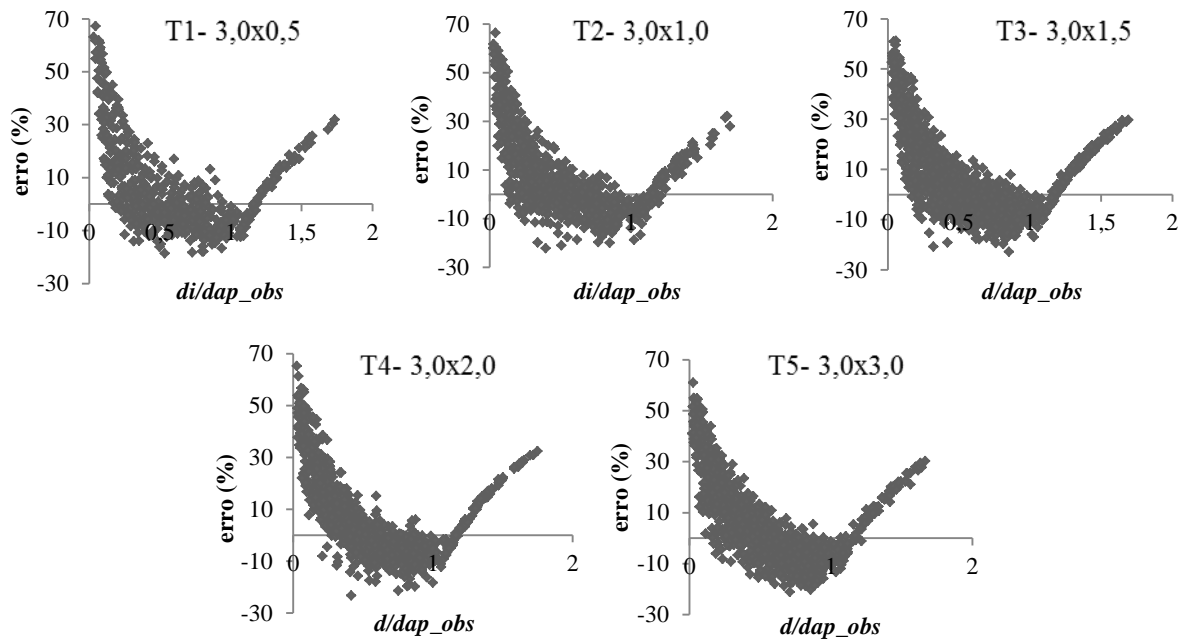


Figura 2A: Valores de d/dap observados em função de seus correspondentes valores de erros estimados em porcentagem, referentes aos ajustes do modelo de Demaerschalk (1972), em árvores de eucalipto conduzidas em diferentes arranjos espaciais, Itamarandiba-MG..

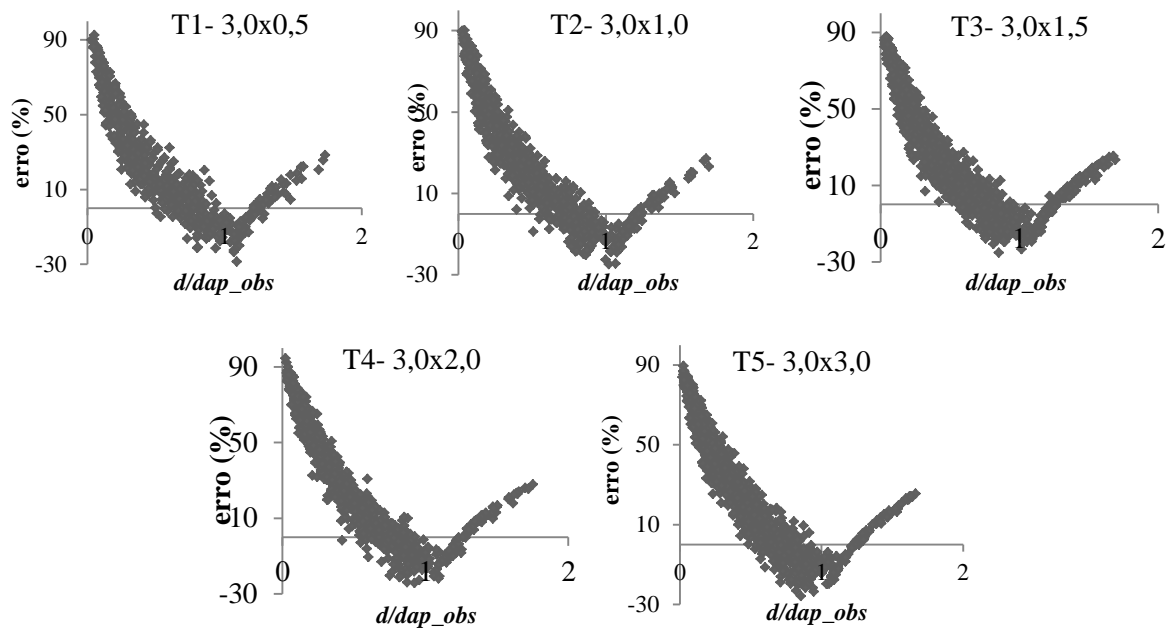


Figura 3A: Valores de d/dap observados em função de seus correspondentes valores de erros estimados em porcentagem, referentes aos ajustes do modelo de Ormerod (1973), em árvores de eucalipto conduzidas em diferentes arranjos espaciais, Itamarandiba-MG.

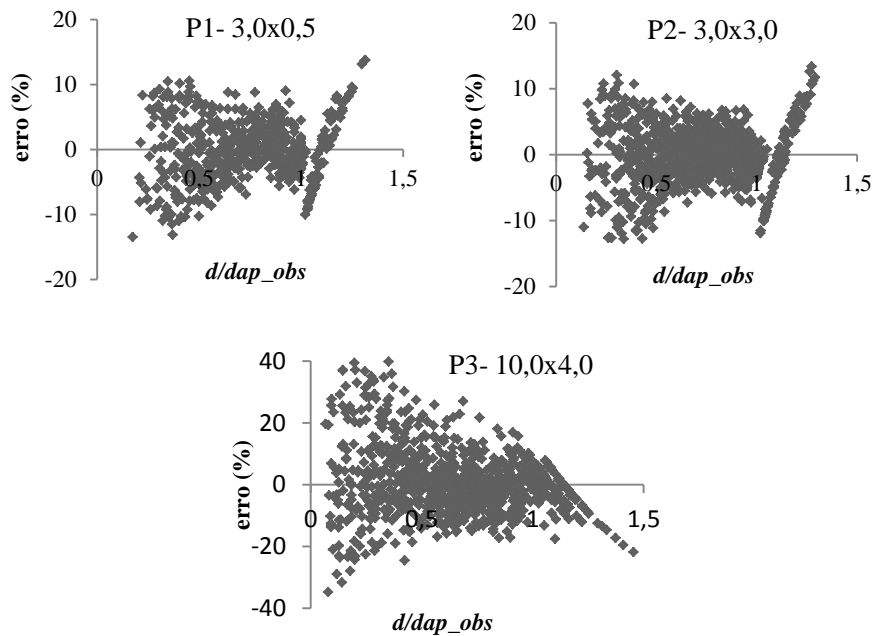


Figura 4A: Valores de d/dap observados em função de seus correspondentes valores de erros estimados em porcentagem, referentes aos ajustes do modelo de Garay (1969), em árvores de eucalipto conduzidas em diferentes arranjos espaciais.