

**SIMONE SILVA**

**EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR  
VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM SISTEMAS AGROSSILVIPASTORIS  
NA ZONA DA MATA MINEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2016**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586e  
2016  
Silva, Simone, 1989-  
Eficiência de redes neurais artificiais para estimar variáveis dendrométricas em sistemas agrossilvipastoris na Zona da Mata Mineira / Simone Silva. – Viçosa, MG, 2016.  
v, 96f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Silvio Nolasco de Oliveira Neto.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Florestas - Medição. 2. Levantamentos florestais.  
3. Eucalipto. 4. Madeira - Exploração. 5. Redes neurais artificiais. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

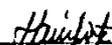
CDD 22. ed. 634.95

**SIMONE SILVA**

**EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR  
VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM SISTEMA AGROSSILVIPASTORIL  
NA REGIÃO DA ZONA DA MATA MINEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae

APROVADA: 22 de Julho de 2016.

  
\_\_\_\_\_  
Helio Garcia Leite  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Aline Edwiges Mazon de  
Alcântara

  
\_\_\_\_\_  
Sílvio Nolasco de Oliveira  
Neto  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha família.

Ao CNPq pelo financiamento do trabalho.

Ao meu orientador professor Sílvio Nolasco de Oliveira Neto, que sempre esteve disposto a ajudar, direcionar, corrigir, orientar e repassar conhecimentos fundamentais na execução deste trabalho.

Ao professor Helio Garcia Leite, pela coorientação, conselhos e pelos valiosos ensinamentos e suporte que contribuíram para elaboração deste trabalho, com certeza, meu maior exemplo e inspiração de Engenheiro Florestal.

À Aline Mazon, pela disponibilidade em compor a banca e ao Carlos Araújo, pelo grande auxílio, paciência e suporte em análises deste trabalho.

Aos colegas Amana, Adênio, Bruno, Cristina, Maria Tereza e Ricardo, pelo auxílio nas coletas de dados, e aos amigos da “salinha do manejo” e do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pela amizade, apoio, paciência e ajuda nos momentos mais cruciais da minha vida.

À secretaria de Pós-graduação do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pelas informações e favores atendidos.

Aos amigos de Viçosa que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos da minha vida, com certeza minha segunda família.

Ao Engenheiro Agrônomo Rogério Jacinto Gomes, ao Professor Lino Roberto Ferreira, coordenadores do Circuito Zona da Mata de Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (Parceria EMATER-MG / Universidade Federal de Viçosa) e aos produtores rurais, pela disponibilidade das unidades demonstrativas de campo para a coleta de dados.

Ao Pólo de Excelência em Florestas, programa de desenvolvimento e pesquisa vinculado à Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Ensino Superior de Minas Gerais (SEDECTES), pelo suporte na realização da pesquisa.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
CAPÍTULO I.....	7
USO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR VOLUME DE MADEIRA EM SISTEMAS AGROSSILVIPASTORIS NA ZONA DA MATA MINEIRA.....	
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3. RESULTADOS.....	18
4. DISCUSSÃO.....	411
5. CONCLUSÃO.....	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
CAPÍTULO II.....	577
REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR O AFILAMENTO DO FUSTE DE EUCALIPTO EM SISTEMAS AGROSSILVIPASTORIS NA ZONA DA MATA MINEIRA.....	
1. INTRODUÇÃO.....	58
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	60
3. RESULTADOS.....	68
4. DISCUSSÃO.....	84
5. CONCLUSÃO.....	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

## RESUMO

SILVA, Simone, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2016. **Eficiência de redes neurais artificiais para estimar variáveis dendrométricas em sistemas agrossilvipastoris na Zona da Mata mineira.** Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientador: Helio Garcia Leite.

O objetivo deste estudo foi estimar o volume e o afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris em quatro municípios da Zona da Mata mineira, comparando modelos de regressão e redes neurais artificiais, e analisar o potencial de multiprodutos da madeira em um sistema agrossilvipastoril. Os dados foram provenientes de cinco sistemas agrossilvipastoris, localizados em quatro municípios, com diferentes arranjos espaciais (8 x 3 m, 10 x 3 m, 11 x 3 m, 12 x 3 m, 12 x 2 m e 12 x 4 m), idades (5,5; 6,5 e 8 anos) e genótipos (GG100, 3336, CRV 1189 e I144), para os quais foram cubadas 122 árvores-amostra. Foram ajustados um modelo hipsométrico, dois volumétricos e quatro de afilamento do fuste, considerando todos os dados e a estratificação dos mesmos por localidade, arranjo espacial e genótipo. Em seguida, foram aplicados testes de identidade para verificar a viabilidade de equações específicas por estrato. Redes neurais artificiais (RNA) do tipo Multilayer Perceptron foram treinadas, utilizando como variáveis de entrada categóricas o arranjo espacial, a localidade e os genótipos. As variáveis de entrada contínuas utilizadas para geração das estimativas hipsométricas foram o diâmetro à altura do peito - 1,30 m de altura (dap), altura dominante (hd) e idade. Para obtenção das estimativas volumétricas utilizou-se o dap, altura total (Ht) e idade. Com relação às variáveis de entrada contínuas utilizadas na geração de estimativas do afilamento do fuste, além do dap, Ht e idade, utilizou-se a altura de cada seção (h). A precisão dos métodos foi avaliada por meio das estatísticas da raiz quadrática do erro quadrático médio, correlação entre valores observados e estimados, dispersão dos erros percentuais, e o desvio médio absoluto. As equações obtidas com ajuste do modelo proposto por Campos et al. (1984), Schumacher e Hall (1933) e Garay (1979) apresentaram maior exatidão. Constatou-se que, assim como os modelos de regressão, as RNA foram metodologias eficientes para estimar o volume e o afilamento do fuste de árvores de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira, e que as árvores do sistema agrossilvipastoril estudado apresentaram maior potencial de retorno financeiro quando destinadas a multiprodutos.

**Palavras-chave:** sistema agroflorestal, produção de madeira, taper, multiprodutos, eucalipto.

## ABSTRACT

SILVA, Simone, M. Sc., Federal University of Viçosa, July 2016. **Efficiency of artificial neural networks for estimating dendrometric variables in agroforestry systems of the Zona da Mata region.** Adviser: Sílvia Nolasco de Oliveira Neto. Co-adviser: Helio Garcia Leite.

The aim of this study was to estimate the volume and the taper of eucalypt stem in agrosilvopastoral systems in four municipalities of the Zona da Mata region, comparing regression models and artificial neural networks, and analyze the potential multiproduct timber in a agrosilvopastoral system. The data were from five agrosilvopastoral systems located in four counties, with different spatial arrangements (8 x 3 m, 10 x 3 m, 11 x 3 m, 12 x 3 m, 12 x 2 m 12 x 4 m), ages (5.5, 6.5 and 8 years) and genotypes (GG100, 3336, CRV 1189 and I144), for which it was scaled 122 trees-sample. They were adjusted one hipsometric model, two volumetric and four taper-considering all the data and the layering of the same by location, spatial arrangement and genotype. Then identity tests were applied to verify the viability of specific equations for each stratum. Artificial neural networks (ANN) type Multilayer Perceptron were trained using categorical input variables the spatial arrangement, location and genotypes. Continuous input variables used to generate the hipsometric estimates were the diameter at breast height - 1.30 m in height (dbh), dominant height (hd) and age. To obtain estimates of volumetric used the dbh, total height (Ht) and Age. With regard to the continuous input variables used to generate the stem taper estimates, beyond the dhb, Ht , age and height was used for each section (h). The accuracy of the methods was assessed by the square root of the mean squared error statistics, correlation between observed and estimated values, dispersion of percentage errors, and the mean absolute deviation. The equations to fit the model proposed by Campos et al. (1984), Schumacher and Hall (1933) and Garay (1979) showed greater accuracy. It was found that, as the regression models, the RNA were efficient methodologies to estimate the volume and the taper of the eucalypts tree in agroforestry systems in the Zona da Mata region, and the trees of the studied agrosilvopastoral system presented greater potential for financial return when intended for multiproduct.

**Keywords:** agroforestry system; timber production; taper; multiproduct; eucalypt.

## INTRODUÇÃO GERAL

O uso intensivo do solo sem as devidas práticas de manejo pode ocasionar em perdas de produtividade e degradação das áreas destinadas à agricultura. Uma das principais atividades correlacionada a esta problemática é a pecuária convencional, a qual tem contribuído para quedas de fertilidade dos solos e degradação das pastagens (FREITAS et al. 2013).

Pastagens degradadas ocorrem com frequência na região da Zona Mata da mineira, que é caracterizada por uma estrutura fundiária de pequenas propriedades rurais, com predomínio de atividades agropecuárias (SARAIVA et al. 2015). Uma possível alternativa de uso da terra mais sustentável para a recuperação dessas áreas é a adoção de sistemas agrossilvipastoris (VALE et al. 2004).

Os sistemas agrossilvipastoris são conhecidos como técnicas de uso da terra, com a associação e interação ecológica de espécies arbóreas, culturas agrícolas, espécies forrageiras e, ou, animais (NAIR, 1993; FERREIRO-DOMINGUEZ et al. 2011). Quando bem manejados, estes sistemas podem proporcionar benefícios econômicos e ambientais, como a diversificação da produção, aumento de renda, conservação do solo e dos recursos hídricos, ciclagem de nutrientes e fixação de carbono (OLIVEIRA NETO et al. 2010).

Políticas públicas governamentais como o Programa Nacional de Agricultura Familiar (PRONAF) e o Programa de Agricultura de Baixo Carbono BRASIL (2012) têm incentivado a implantação destes sistemas, através linhas de créditos que se adequam as necessidades do produtor rural. Contudo, apesar do interesse pela adoção, pouco se sabe a respeito da produtividade dos sistemas agrossilvipastoris da Zona da Mata, incluindo informações sobre a produção volumétrica, para subsidiar análises de viabilidade econômica (BINOTI et al. 2012).

A produção volumétrica de madeira pode ser estimada com auxílio de modelos de regressão ou de redes neurais artificiais (RNA) (SILVA et al. 2009). Esta última pode ser definida como uma técnica computacional composta por vários neurônios artificiais, os

quais se encontram conectados de uma maneira específica e distribuídos em camadas paralelas (BRAGA et al. 2007; BULLINARIA, 2014).

As principais vantagens inerentes à aplicação das RNA em estudos da modelagem das variáveis dendrométricas são: permitir a inserção não só de variáveis quantitativas, como também qualitativas, adaptar suas conexões às oscilações do ambiente, analogia neurobiológica, capacidade de encontrar solução para problemas mais complexos devido ao fato de possuírem facilidade em aprender e aplicar o conhecimento adquirido, além de serem tolerantes a ruídos e falhas e de, também, poderem ser retreinadas (HAYKIN, 2001; BRAGA et al. 2000).

Estudos envolvendo a modelagem de variáveis de povoamentos de espécies arbóreas utilizando regressão e RNA foram conduzidos em monocultivos (BINOTI et al. 2013; CORDEIRO et al. 2015; VENDRUSCOLO et al. 2015; LEAL et al. 2015). Entretanto, são escassos em sistemas agrossilvipastoris (SILVA et al. 2016), onde as espécies arbóreas são implantadas em arranjos espaciais mais amplos que influenciam o crescimento e a forma do tronco das árvores (NOGUEIRA et al. 2008).

A importância do estudo da forma do fuste das árvores está associada à possibilidade da previsão do sortimento da madeira (MENDONÇA et al. 2015). Assim, como para a altura e volume, o afilamento do fuste também pode ser estimado por regressão e RNA (MARTINS et al. 2015). Segundo alguns autores, a madeira oriunda de sistemas agroflorestais pode conferir maior lucratividade ao produtor rural quando é destinada a multiprodutos como madeira serrada, energia, postes, mourão, lenha, entre outros (SILVEIRA et al. 2011; MÜLLER et al. 2011; SILVA et al. 2016).

Com relação à modelagem das variáveis do povoamento, em sistemas agrossilvipastoris e silvipastoris, destacam-se os trabalhos conduzidos por Souza et al. (2007), Salles et al. (2012), Binoti et al. (2012) e Fontan et al. (2011). Contudo, parte destes estudos foram conduzidos na região noroeste do Estado de Minas Gerais, havendo escassez de equações específicas para os sistemas na região da Zona da Mata mineira. Diante disso, este trabalho teve por objetivo quantificar o estoque volumétrico de madeira e estimar o afilamento do fuste de árvores de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris, em quatro municípios da Zona

da Mata mineira, por meio de redes neurais artificiais e pelo método convencional de regressão, a fim de se determinar a melhor alternativa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução dos custos de inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, n. 1, p. 125-129,2013.

BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L. M.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; SANTOS, F. L. Descrição da distribuição diamétrica de sistemas agrossilvipastoris utilizando as funções Weibull e Hiperbólica. **Revista Árvore**, v. 36, p. 349 - 356, 2012.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDEMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 260 p.

BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B.; CARVALHO, A. P. de L. F. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 262p.

BULLINARIA, J. A. Introduction to neural computation: notas de aula. 2014. Disponível em: <http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>. Acesso em 07/06/2016.

CORDEIRO, M. A.; PEREIRA, A. R. S.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para quantificação volumétrica de árvores de eucalipto no Estado do Amapá. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 15 , n. 1, p. 48-58, 2015.

FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; MOSQUERA-LOSADA, M. R. Response to sewage sludge fertilisation in a Quercus rubra L. silvopastoral system: Soil, plant biodiversity and tree and pasture production. **Agriculture, Ecosystems & Environmental**. v. 141, n. 12, p. 49-57, 2011.

FONTAN, I. C. I.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; MONTE, M. A.; RAMOS, D. C.; SOUZA, F. C. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 83, p. 121-131, 2011.

FREITAS, E.C.S.; OLIVEIRA NETO, S.N.; FONSECA, D.M.; SANTOS, M.V.; LEITE, H.G.; MACHADO, V.D. Deposição de serapilheira e nutrientes no solo em sistemas agrossilvipastoris com eucalipto e acácia. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.409-417, 2013.

HAYKIN, S. **Redes neurais: Princípios e prática** 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

LEAL, F. A.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; PEREIRA, R. S. Redes neurais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e números de árvores. **Revista Brasileira de Biometria**, v.33, n.2, p.233-249, 2015.

MARTINS, E. R.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H.G.; BINOTI, D. H. B.; DUTRA, G. C. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do afilamento do fuste de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.11, n.1, p.33-38, 2016.

MENDONÇA, R. A.; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F.; SOUZA, A. L.; TRUGILHO, P. F.; CARVALHO, S. P. C.; POSSATO, E. L. Modelagem da produção de sortimentos em povoamentos de eucalipto. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 587-594, 2014.

MÜLLER, M. D. ; SALLES, T. T.; C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. R. T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, v. 44, n.3, p. 473 - 484, 2014.

MÜLLER, M. D.; NOGUEIRA, G. S.; CASTRO, C. R. T. de; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. F.; CASTRO, R. V. O.; FERNANDES, E. N. Economic analysis of an agrosilvipastoral system for a mountainous area in Zona da Mata Mineira, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n.10, p. 1148 - 1153, 2011.

NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. 499 p.

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**, v. 32, n.5, p. 855 - 860 2008.

OLIVEIRA NETO, S. N.; VALE, A.B.; NACIF, A.P.; VILAR, M.B.; ASSIS, J.B . SISTEMA AGROSSILVIPASTORIL - **Integração Lavoura, Pecuária e Floresta**. 1ª. ed. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais - SIF, 2010. 189p.

Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura : plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília : MAPA/ACS, 2012. 173 p.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SOARES, C. P. B.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 253 - 260, 2012.

SARAIVA D. T.; FERREIRA, R. L.; TEIXEIRA, C. C.; GOMES, R. J.; OLIVEIRA NETO, S. N.; TORRES, C. M. M. E. Extension events of integrated crop-livestock-forest in the Zona da Mata Mineira, Brazil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA, 2015. **Anais...** Brasília: 2015. Disponível em <http://wcclf2015.com.br/anais/busca/index.php?lang=pt>. Acesso em: 10 \08 \2015 .

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**, v.33, n.6, p.1133-1139, 2009.

SILVA, S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; OBOLARI, A. M. M.; SCHETTINI, B. L. S. Avaliação do uso da regressão e de rede neurais artificiais em sistema silvipastoril para a modelagem do afilamento do fuste de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**. v. 13, n.23, p. 189-199, 2016.

SILVEIRA, D. P.; LEITE, H. G.; SILVEIRA, V. P.; MELIDO, R. C. N. Classificação de árvores de eucalipto para postes em sistemas agroflorestais. **Revista Árvore**, v.35, n.4, p.875-872, 2011.

VALE R. S.; COUTO, L.; SILVA, M.L.; GARCIA, R.; ALMEIDA, J.C. de C. LANI, J. L. Análise da viabilidade econômica de um sistema silvipastoril com eucalipto para a Zona da Mata de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, v.1, n.2, p.107-120, 2004.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R., SOUZA, H. S.; MOURA, J, P. V. M.; MAMORÉ, F. M. D.; SIQUEIRA, T. A. S. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v.33, n.4, p.556-569, 2015.

## CAPÍTULO I

### **USO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR O VOLUME DE MADEIRA EM SISTEMAS AGROSSILVIPASTORIS NA ZONA DA MATA MINEIRA**

#### **RESUMO**

SILVA, Simone, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2016. **Uso de redes neurais artificiais para estimar o volume de madeira em sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira.** Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientador: Helio Garcia Leite.

O objetivo deste estudo foi estimar o estoque volumétrico de madeira de sistemas agrossilvipastoris em municípios da Zona da Mata mineira, por meio de redes neurais artificiais e modelos de regressão com intuito de determinar a melhor alternativa. Os dados foram provenientes de cinco sistemas agrossilvipastoris, localizados em quatro municípios, com diferentes arranjos espaciais (8 x 3 m, 10 x 3 m, 11 x 3 m, 12 x 3 m, 12 x 2 m e 12 x 4 m), idades (5,5; 6,5 e 8 anos) e genótipos (GG100, 3336, CRV 1189 e I144), para os quais foram cubadas 122 árvores-amostra. Foram ajustados um modelo hipsométrico e dois volumétricos, considerando todos os dados e a estratificação dos mesmos por localidade, arranjo espacial e genótipo. Foram aplicados testes de identidade para verificar a viabilidade de ajuste de uma equação geral e equações específicas. Redes neurais artificiais (RNA) do tipo Multilayer Perceptron foram treinadas utilizando como variáveis categóricas o arranjo espacial, a localidade e os genótipos. Para geração das estimativas hipsométricas utilizaram-se as variáveis de entrada contínuas diâmetro à altura do peito - 1,30 m de altura (dap), altura dominante (Hd) e idade. Na obtenção das estimativas volumétricas utilizaram-se o dap, altura total (Ht) e idade. A precisão dos métodos foi avaliada por meio das estatísticas da raiz do erro quadrático médio, correlação entre valores observados e estimados, dispersão dos erros percentuais, e o desvio médio absoluto. As RNA demonstram ser uma metodologia eficiente para estimativas hipsométricas e

volumétricas de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris na região de estudo. A produtividade de madeira dos sistemas agrossilvipastoris variaram de 21 a 49 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** Sistema agroflorestal, eucalipto, inteligência artificial, inventário.

## 1. INTRODUÇÃO

O cultivo de espécies arbóreas pode constituir uma fonte de renda alternativa para produtores rurais. Entretanto, o gerenciamento da atividade florestal apresenta um horizonte de planejamento extenso, tornando, às vezes, o cultivo de árvores em sistema de monocultura uma opção menos viável do ponto de vista socioeconômico, quando comparado a outras atividades agrícolas que oferecem retornos em curto prazo (DUBÉ et al. 2000).

Uma possível alternativa para o desenvolvimento florestal sustentável da região da Zona da Mata Mineira é a implantação de sistemas agrossilvipastoris (SASPs) uma vez que a região possui aptidão para pecuária e o estabelecimento da atividade florestal. Esta região é composta por pequenas propriedades rurais, que tendo como principal atividade a pecuária convencional (SARAIVA et al. 2015). A adoção destes sistemas pode gerar benefícios socioeconômicos e ambientais, promover maior eficiência no uso da terra, diversificar a produção e estabelecer oferta de produtos mais constantes ao longo do ano, assim como oferecer maior conforto térmico aos animais (MAGALHÃES et al. 2007; BERNARDINO & GARCIA et al. 2009; FERREIRO-DOMÍNGUEZ et al. 2011).

A adoção de sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris é incentivada por políticas públicas como o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF Floresta), com créditos destinados a estimular as práticas agroflorestais e o manejo florestal sustentável entre agricultores familiares. E o plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), com financiamento de projetos sustentáveis que possibilitam a neutralização das emissões de gases do efeito estufa por meio da fixação biológica do nitrogênio (FBN); da recuperação áreas degradadas; sistema plantio direto (SPD) e da integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), dentre outras atividades BRASIL (2012).

Apesar de existir interesse pela adoção destes sistemas, são escassos os registros sobre a produtividade na região da Zona da Mata mineira. Informações sobre os estoques volumétricos de madeira são consideradas importantes, assim como dos demais componentes dos sistemas, uma vez que compõem a base de dados para as análises econômicas junto a produtores rurais, auxiliando-os em suas tomadas de decisão (BINOTI et al. 2012).

A quantificação do volume de madeira é feita por inventário florestal, onde as estimativas volumétricas são obtidas empregando modelos de regressão (LEITE & ANDRADE, 2002; CAMPOS & LEITE, 2013), ou redes neurais artificiais (RNA) (GÖRGENS et al. 2009; CORDEIRO et al. 2015).

Vários estudos foram conduzidos para estimar altura e volume de árvores empregando RNA (DIAMANTOPOULOU, 2005; GÖRGENS et al. 2009; RODRIGUES et al. 2010; LEITE et al. 2011; BINOTI et al. 2013; BINOTI et al. 2014 e SILVA et al. 2016). Esses estudos demonstraram que as RNA podem gerar estimativas tão precisas quanto a regressão, ou até mesmo superiores (VENDRUSCOLO et al. 2015; OZÇELIK et al. 2013; DIAMANTOPOULOU et al. 2015).

No entanto, a maioria destas pesquisas foram realizadas em monoculturas arbóreas, sendo escassas em plantios consorciados (MÜLLER et al. 2014; SILVA et al. 2016). Com relação à modelagem utilizando o método da regressão em sistemas agroflorestais em Minas Gerais, pode-se mencionar o trabalho realizado por Dubé et al. (2000), que adotaram um modelo simples para determinar o volume de madeira de um sistema agrossilvipastoril considerando somente a idade como variável independente.

Fontan et al. (2011) ajustaram o modelo de Schumacher em função da idade, na forma linearizada, para estimar o volume de madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* em sistema agroflorestal. Esses clones foram submetidos a diferentes intensidades de desrama no arranjo espacial 9,5 x 4,0 m.

Com a finalidade de modelar o afilamento do fuste, Silveira et al. (2011) classificaram árvores para postes empregando o modelo proposto por Garay (1979) em sistema agrossilvipastoril, na região noroeste de Minas Gerais. Müller et al. (2014) avaliaram modelos para estimar altura, volume e afilamento do fuste de eucalipto e acácia

em um sistema silvipastoril, no arranjo espacial 3 x 3 + 30 m, aos 10 anos de idade. Barbosa (2015) empregou o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933), na sua forma linearizada, para estimar o volume de clones de *E. camaldulensis* x *E. grandis* em sistema agrossilvipastoril, em diferentes arranjos espaciais iniciais (9,5 x 1,5 m; 9,5 x 2,0 m; 9,5 x 3,0 m e 9,5 x 4,0 m).

A maioria desses estudos foram conduzidos na região noroeste do Estado de Minas Gerais. No entanto, em virtude das diferenças de índice local, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas para desenvolver modelos específicos para os SASPs da região da Zona da Mata mineira.

Diante do exposto, este trabalho objetivou modelar a produção volumétrica de árvores em SASPs de quatro municípios da Zona da Mata mineira, por meio de redes neurais artificiais e modelos de regressão, com intuito de determinar a melhor alternativa e quantificar o estoque volumétrico.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

A mesorregião da Zona da Mata possui clima com influência das variações altimétricas. De acordo com Golfari (1975), a região possui, em média, temperaturas de 18°C, precipitações em torno de 1.500 mm, com pelo menos 3 ou 4 meses de estiagem por ano. A topografia apresenta relevo do montanhoso ao ondulado, com predomínio de latossolos profundos e drenados, com acidez elevada e baixa fertilidade natural (CURI et al. 1992).

A Zona da Mata mineira é formada por 142 municípios que estão agrupados em sete microrregiões: Juiz de Fora, Cataguases, Muriaé, Ubá, Manhuaçu, Ponte Nova e Viçosa (IBGE, 2015). A microrregião de Viçosa é composta por vinte municípios dentre eles as cidades de Viçosa, Cajuri e Coimbra. A microrregião de Ubá, é formada por dezessete municípios, a exemplo tem-se a cidade de Visconde do Rio Branco (IBGE, 2015).

O município de Viçosa esta localizado a 20° 46' de latitude sul e 42° 51' de longitude oeste. De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo

Cwb, mesotérmico com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos. A cidade ocupa área de 299,397 km<sup>2</sup> e possui altitudes que oscilam de 600 a 970 m. Nessa região predominam os latossolos vermelho-amarelo distróficos, a topografia é constituída pelo domínio dos mares de morros (RADAMBRASIL, 1983; CORREA, 1984). A cidade de Cajuri tem como coordenadas geográficas 20° 47' de latitude sul e 42° 47' de longitude oeste. O clima é do tipo Cwa segundo a classificação Köppen, a precipitação média anual gira em torno de 1253 mm, onde os verões são chuvosos e os invernos secos. A temperatura média anual é de 20 °C (RIBEIRO et al. 2014; IBGE, 2015). Já Coimbra está situada nas coordenadas geográficas de 20° 50' na latitude sul e 42° 48' de longitude oeste. O clima de acordo com Köppen é do tipo Cwa com altitude de 715 m. A precipitação média anual é de 1350 mm, as chuvas se concentram nos meses de outubro a março com um período de estiagem bem definido. Os solos da região são classificados como argissolos vermelho-amarelo (SANTOS et al. 2006).

O município de Visconde do Rio Branco está localizado a 21°00' de latitude sul e 42°50' de longitude oeste. O clima é classificado segundo Köppen como Cwa com altitude media em torno de 350 m. A precipitação média anual gira em torno de 1100 mm, com chuvas concentradas no período de outubro a março. Os solos do município são classificados como latossolos vermelho-amarelo distróficos e álicos (SILVA et al. 2009; PORTUGAL et al. 2010).

## **2.1. Descrição dos dados**

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos em sistemas agrossilvipastoris constituídos de milho (*Zea mays*), que foi cultivado no primeiro ano dos sistemas, capim-braquiária (*Brachiaria spp.*) e eucalipto (*Eucalyptus spp.*). Esses sistemas foram implantados em quatro municípios na região de Viçosa, na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, conforme descrição na Tabela 1.

Tabela1. Caracterização das localidades onde foram implantados os sistemas agrossilvipastoris estudados, na região da Zona da Mata mineira.

Localidade	Altitude (m)	Temperatura Média (°C)	Precipitação Média anual (mm)	Área (ha)	Ano Implantação	Genótipo Eucalipto	Arranjo espacial (m)
Viçosa – UFV (Correa, 1984)	600 a 970	19,4	1.221	0,6	2007	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100)	12 x 2 e 12 x 4*
Viçosa – Deserto (Correa, 1984)	600 a 970	19,4	1.221	0,9	2007	Eucalyptus grandis x E. urophylla (3336)	8 x 3
Coimbra (Santos et al. 2006)	715	19,0	1.350	3,	2009	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100)	12 x 3
Visconde do Rio Branco (Silva et al. 2009)	345	24,0	1.100	6	2010	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100 e I144) e Eucalyptus grandis (CRV1189)	10 x 3
Cajuri (Ribeiro et al. 2014)	600 a 900	20,0	1.253	2	2007	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100)	11 x 3

\* O sistema agrossilvipastoril localizado na localidade Viçosa – UFV, inicialmente, era composto por eucalipto e eucalipto + acácia (intercaladas na linha de plantio), em arranjo espacial de 12 x 2 m. Aos 4 anos de idade, realizou-se desbaste da acácia proporcionando os arranjos espaciais 12 x 2 m e 12 x 4 m.

## 2.2. Coleta de dados

Realizou-se o inventário florestal em todos os sistemas descritos na Tabela 1 por meio de duas metodologias, sendo o censo (100%) para as localidades Viçosa-UFV e Viçosa-Deserto e a amostragem em parcelas para as demais. Nas localidades com amostragem, foram instaladas três parcelas por genótipo, contendo um número de 24 plantas cada, onde foram coletados os diâmetros de todas as árvores e a altura das 8 primeiras de cada parcela.

Foram cubadas 122 árvores-amostra, utilizando-se duas metodologias, sendo, para as localidades Viçosa-UFV e Viçosa Deserto, onde não havia restrição para o abate das árvores, a cubagem convencional. Nas demais localidades, onde ocorria tal restrição, foram realizadas cubagens em pé por meio do aparelho pentaprisma de Weeler. Para isso, selecionou-se três árvores amostras por classes de diâmetro, com amplitude de 2 cm. A medição das árvores cubadas foi realizada nas posições 0,1, 0,3, 0,7, 1,0, 1,3 m. A partir da altura de 1,3 m até a altura cujo diâmetro fosse igual a 7,0 cm (diâmetro comercial), os diâmetros foram medidos a cada 1,0 m.

O volume individual, com casca, de cada árvore foi calculado pela fórmula de Smalian (1), sendo obtido pela soma dos volumes individuais das seções:

$$V = (AS_1 + AS_2)/2 * L \quad (1)$$

Em que:

V = Volume com casca da seção, em m<sup>3</sup>;

AS<sub>1</sub> = Área seccional do início da seção, em m<sup>2</sup>;

AS<sub>2</sub> = Área seccional do final da seção, em m<sup>2</sup>;

L = Comprimento da seção, em m.

## 2.3 Análise dos dados

### 2.3.1 Regressão

Os dados obtidos na cubagem foram empregados para ajuste de modelos hipsométricos e volumétricos. A altura foi estimada através do modelo proposto por Campos et al. (1984) (2), sendo a altura dominante obtida com base na média das alturas dos três maiores diâmetros por hectare encontrados em cada parcela, ou no caso

de censo, em cada linha de plantio, de acordo com Assmann (1970). Para geração das estimativas volumétricas empregaram-se os modelos volumétricos propostos por Spurr (1952), na sua forma linearizada (3), e Schumacher e Hall (1933) (4).

$$\text{LnHt} = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^{-1} + \text{LnHd} + \varepsilon \quad (2)$$

$$V = \beta_0 \text{dap}^{\beta_1} \text{Ht}^{\beta_2} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{LnV} = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(\text{dap}^2 \text{Ht}) + \varepsilon \quad (4)$$

em que:

V= Volume, em m<sup>3</sup>;

Ht = altura total da árvore, em m;

Hd= altura dominante, em m;

dap = diâmetro com casca na altura 1,3 m, em cm;

$\beta_i$ = parâmetros do modelo;

$\varepsilon$  = erro aleatório.

Os parâmetros dos modelos foram estimados pelo método de mínimos quadrados, utilizando-se o algoritmo Gauss Newton (STATSOFT INC, 2016).

Foi aplicado o teste de identidade (GRAYBILL, 1976) para avaliar a necessidade de uso de ajustes específicos por estrato (localidade, arranjo espacial e genótipo). A hipótese de nulidade do teste foi que não existe diferença significativa entre uma equação geral e equações específicas, por área e arranjo espacial inicial.

### 2.3.2 Avaliação dos métodos

A avaliação e escolha dos métodos foram realizados com base nas estatísticas da raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEQM) (5), correlação entre os dados observados e estimados ( $r_{y\hat{y}}$ ) (6), e a média dos desvios absolutos (7). Ainda, foram analisados gráficos de dispersão dos erros relativos percentuais e histograma de frequência desses erros (8).

$$RQEQM \% = \frac{100}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$r_{y\hat{y}} = \frac{cov(Y_i - \bar{Y}_i)}{\sqrt{var(Y_i)var(\hat{Y}_i)}} \quad (6)$$

$$DMA = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (7)$$

$$ER\% = \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)}{Y_i} \times 100 \quad (8)$$

em que:

$\bar{Y}$  = é a média dos valores observados;

n = é o número total de dados observados;

$\hat{Y}_i$  = valor do i-ésimo diâmetro estimado;

$Y_i$  = valor do i-ésimo diâmetro observado;

cov = covariância;

var = variância.

### 2.3.3 Redes Neurais Artificiais

Além das regressões, para as estimativas de volume e altura foram treinadas redes neurais artificiais do tipo perceptron múltiplas camadas, conhecida como Multilayer Perceptron (MLP), utilizando o mesmo banco de dados de cubagem, considerando 70% do conjunto de dados para treino e os 30% restantes para validação das redes. Os algoritmos de treinamento testados foram Resilient Propagation e Skyp Layer. Cada conjunto de dados foi escolhido pelo algoritmo de treinamento testado no software Neuroforest ® 4.0 ([www.neuroforest.ucoz.com](http://www.neuroforest.ucoz.com)).

Para a estimativa da altura total, foram utilizadas como variáveis contínuas de entrada o dap (cm), Hd (m), e a idade (anos). Como variáveis de entrada categóricas, empregou-se o arranjo espacial, a localidade e o genótipo.

Para a estimação do volume, foram utilizadas as variáveis contínuas de entrada empregaram-se o dap (cm), Ht (m), e a idade (anos). Foram utilizadas as mesmas variáveis categóricas empregadas na obtenção das estimativas hipsométricas.

Na camada oculta, foram considerados 10 neurônios para todos os casos. As variáveis numéricas foram normalizadas no intervalo de 0 a 1. Como critério de parada, foi utilizado o número de ciclos (3.000) e a minimização do erro quadrático médio (0,0001). Para o treinamento das redes neurais artificiais não houve estratificação dos

dados, uma vez que este método permite a inserção de variáveis categóricas de forma simultânea.

Na Tabela 2 são apresentadas as estatísticas descritivas das árvores de eucalipto em sistema agrossilvipastoril amostradas em cada localidade estudada com valores de dap (cm), Ht (m) e volumes médios, assim como os seus respectivos desvios padrões médios.

Tabela 2. Estatísticas descritivas das árvores de eucalipto amostradas em sistemas agrossilvipastoris para cada localidade estudada

	Viçosa - UFV			Viçosa - Deserto			Visconde do Rio Branco			Cajuri			Coimbra		
	dap (cm)	Ht (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	dap (cm)	Ht (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	dap (cm)	Ht (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	dap (cm)	Ht (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	dap (cm)	Ht (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
Média	27,11	31,13	0,7580	24,02	30,32	1,073	19,24	23,34	0,3723	24,86	26,56	0,6080	23,55	29,81	0,5413
Desvio padrão	±4,30	±3,79	±0,2467	±5,75	±8,83	±0,4408	±4,08	±3,23	±0,1399	±5,97	±4,25	±0,2330	±3,39	±3,89	±0,1609
Máximo	38,93	35,70	1,3053	32,20	35,10	1,5739	24,70	27,70	0,5844	31,35	31,00	0,8823	27,56	35,90	0,7083
Mínimo	19,89	19,50	0,3220	9,40	11,8	0,6790	6,11	10,60	0,0178	14,64	18,90	0,1988	17,83	24,10	0,2848
Número de observações	34			17			40			17			14		

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Regressões**

Foram avaliados modelos hipsométricos e volumétricos específicos para cada uma das localidades estudadas.

##### **3.1.1 Viçosa - UFV**

A partir do teste proposto por Graybill (1976) (Tabela 2), verificou-se que para a área Viçosa - UFV os arranjos espaciais iniciais (12 x 2 m e 12 x 4 m) não influenciaram ( $p > 0,05$ ) nas estimativas de volume e altura das árvores. Assim, pode-se constatar que os volumes das árvores dos arranjos espaciais avaliados são próximos.

Para as estimativas da altura, observa-se que o modelo proposto por Campos et al. (1984) resultou em pequeno viés. Esses resultados podem ser observados em modelos hipsométricos, uma vez que a obtenção da altura está sujeita a erros de medição. Contudo, o modelo apresentou frequência de 88% dos erros concentrados nas classes de  $\pm 10\%$ . Dentre os modelos volumétricos testados, através das avaliações realizadas, o proposto por Schumacher e Hall (1933) foi o mais indicado para este local. Para as estimativas volumétricas, observa-se na Figura 1 uma distribuição dos resíduos homogênea para os valores de dap e histogramas com 95% dos erros concentrados entre as classes de erro de  $\pm 10\%$ .

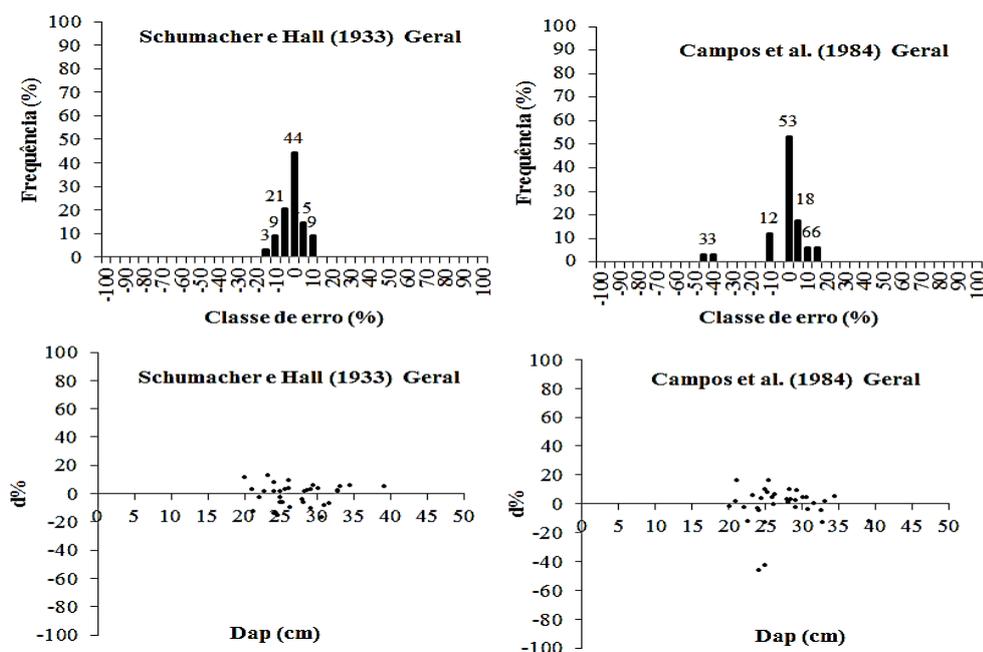


Figura 1. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste dos modelos volumétrico e hipsométrico geral para a localidade Viçosa - UFV, nos arranjos espaciais 12 x 2 m e 12 x 4 m, aos oito anos de idade.

As estatísticas referentes ao ajuste dos modelos são apresentadas na Tabela 3, onde observa-se que os modelos gerais apresentaram desempenho satisfatório, com valores baixos de RQEQM ( $\pm 10\%$ ) e DMA próximos à zero. Porém, os valores de  $r_{y\hat{y}}$  se diferiram, sendo encontrado valor inferior para o modelo hipsométrico.

Tabela 3. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste dos modelos volumétrico e hipsométrico gerais para a localidade Viçosa-UFV, nos arranjos espaciais 12 x 2 m e 12 x 4 m, aos oito anos de idade

Modelo Geral	Parâmetros			RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$			
Schumacher e Hall (1933)	-9,6096*	1,2868*	1,4711*	7,70	0,9717	0,05
Campos et al. (1984)	2,3204*	-11,0239*	0,4427 <sup>ns</sup>	10,30	0,5161	2,36

\*( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup>( $p > 0,05$ ).

### 3.1.2 Viçosa – Deserto

Para a localidade Viçosa - Deserto não foi avaliada a identidade de modelos, pois não houve variação em termos de arranjo espacial, sendo considerado apenas o ajuste por local.

Os modelos propostos por Campos et al. (1984) e Schumacher e Hall (1933) foram recomendados para o sistema. Ambos apresentaram 100% da frequência em torno da classe de erro  $\pm 10\%$ . Em relação aos gráficos de dispersão, o modelo hipsométrico apresentou distribuição residual uniforme ao longo das classes de diâmetro, com amplitude de erro de  $\pm 20\%$ . O modelo volumétrico também apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à dispersão residual que se demonstrou uniforme e próxima ao eixo zero, conforme Figura 2.

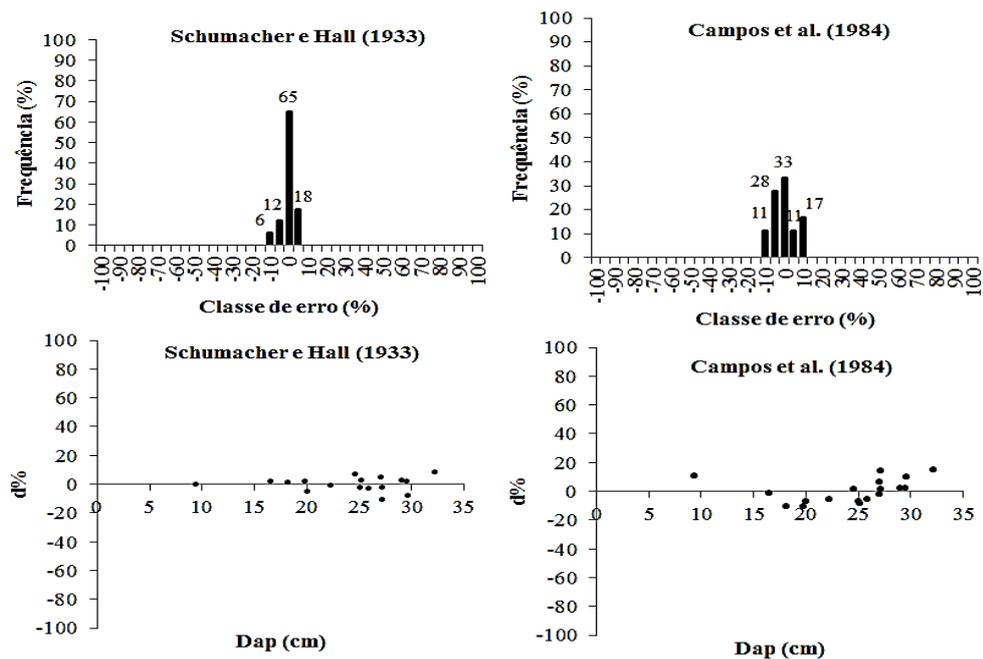


Figura 2. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste do modelo volumétrico e hipsométrico para a localidade Viçosa-Deserto no arranjo espacial 8 x 3 m, aos oito anos de idade.

As estatísticas de avaliação dos modelos (Tabela 4) apresentaram valores médios de RQEQM em torno de  $\pm 8\%$ , altas  $r_{y\hat{y}}$  ( $\pm 0,94$ ), e DMA baixo, indicando boa precisão no ajuste dos modelos, que são apropriados para o local por apresentarem estimativas livres de tendências.

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste dos modelos volumétricos e hipsométricos para a localidade Viçosa - Deserto no arranjo espacial 8 x 3 m, aos oito anos de idade

Modelo	Parâmetros			RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$			
Schumacher e Hall (1933)	-9,39022*	1,41917*	1,42648*	6,11	0,9881	0,05
Campos et al. (1984)	2,4012*	-14,0247*	0,4688 <sup>ns</sup>	7,71	0,9108	1,99

\*( $p < 0,05$ ) ; <sup>ns</sup> ( $p > 0,05$ ).

### 3.1.3 Visconde do Rio Branco

Como na localidade Visconde do Rio Branco foram analisados três genótipos de eucalipto, foi aplicado o teste de identidade para verificar a necessidade de estratificação por genótipo. De acordo com o teste F de Graybill, para estas condições, as estimativas hipsométricas apresentaram diferença ( $p < 0,05$ ), ou seja, a altura foi afetada ( $p < 0,05$ ) pelo genótipo, sendo necessário o ajuste de equações específicas por genótipo. No entanto, as estimativas volumétricas não foram afetadas pelos genótipos ( $p > 0,05$ ), e a seleção do melhor método foi feita ajustando-se uma equação volumétrica geral.

Na Figura 3 são apresentados os histogramas e gráficos de dispersão de resíduos para as equações hipsométricas estratificadas e para a equação volumétrica geral. Quando aplicadas, resultaram em 92% da frequência de erros no intervalo de  $\pm 10\%$  e dispersão de resíduos homogênea em torno de  $\pm 20\%$ .

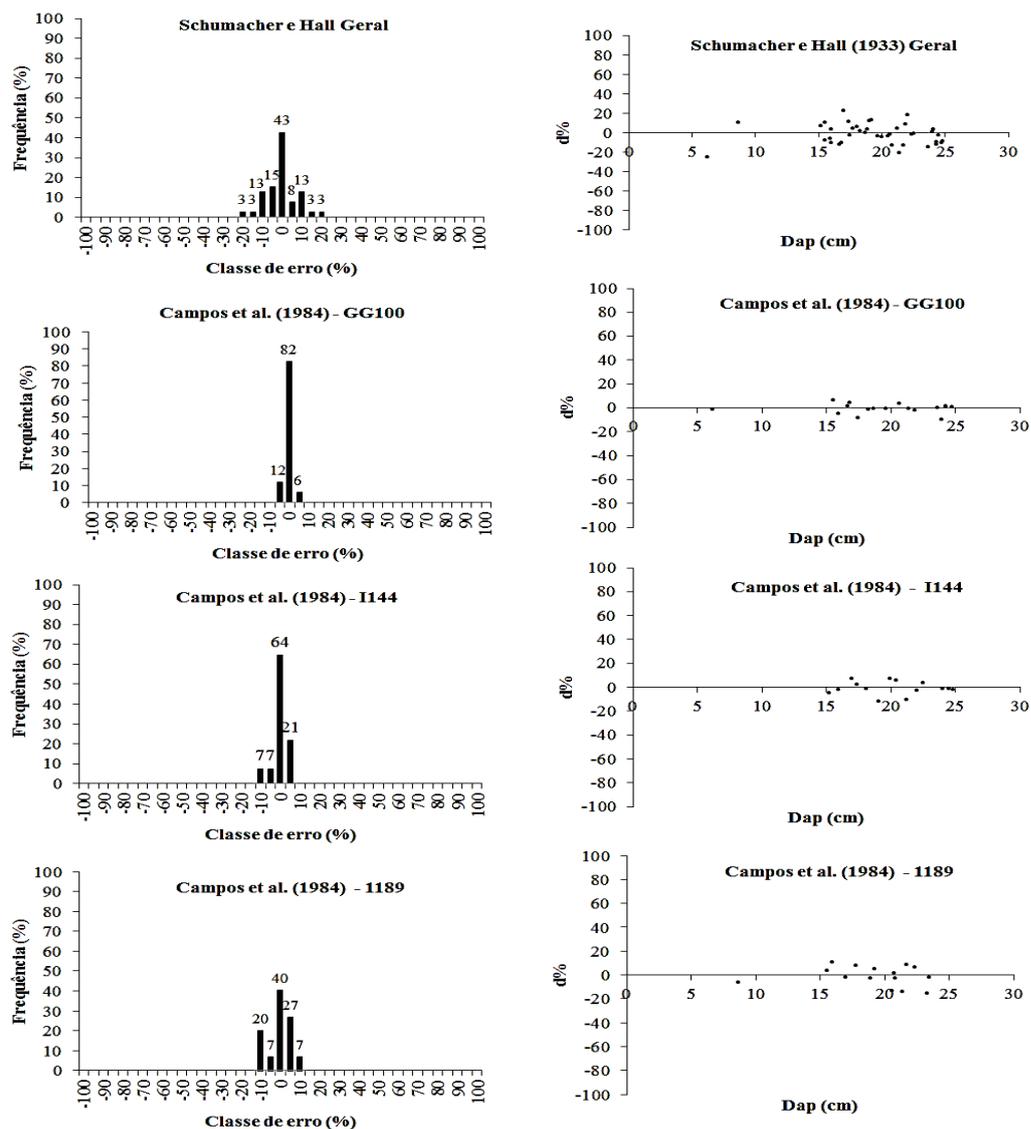


Figura 3. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste dos modelos volumétrico geral e hipsométrico específico por genótipo, para localidade Visconde do Rio Branco, no arranjo espacial 10 x 3 m, aos cinco anos e meio de idade.

De acordo com a Tabela 5, os modelos hipsométricos específicos apresentaram RQEQM inferior a 10% e DMA baixos, uma vez que, quanto menor é o valor resultante dessa última estatística, mais válida são as equações ajustadas. Com relação ao desempenho do modelo volumétrico geral, o valor da RQEQM girou em torno de  $\pm 10\%$ , indicando bom ajuste. Tal valor se assemelha ao obtido pela equação de volume específica da localidade Viçosa-Deserto.

Para as estimativas do crescimento em altura, nesta localidade, recomenda-se o ajuste do modelo proposto por Campos et al. (1984), específico por genótipo. Já para as

estimativas da produção volumétrica, recomenda-se o ajuste do modelo volumétrico geral proposto por Schumacher e Hall (1933).

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste do modelo volumétrico geral e hipsométricos específico, por genótipo, para a localidade Visconde do Rio Branco, no arranjo espacial 10 x 3 m, aos cinco anos e meio de idade

Modelos	Parâmetros			RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$			
Schumacher e Hall (1933) Geral	-8,9181*	1,9521*	0,6661*	10,40	0,9638	0,03
Campos et al. (1984) GG100	1,6074 <sup>ns</sup>	-7,5036*	0,6146*	3,96	0,9634	0,66
Campos et al. (1984) I144	2,0568 <sup>ns</sup>	-5,9019*	0,4378 <sup>ns</sup>	5,41	0,6379	1,01
Campos et al. (1984) 1189	2,0353 <sup>ns</sup>	-9,2986*	0,4921 <sup>ns</sup>	8,06	0,8518	1,49

\*( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup> ( $p > 0,05$ ).

### 3.1.4 Cajuri

No sistema agrossilvipastoril da localidade Cajuri não houve variações de arranjo espacial inicial e genótipo. O modelo hipsométrico proposto por Campos et al. (1984) resultou em frequência de erro de 100%, concentrada nas classes de erro de  $\pm 10\%$  (Figura 4). Dentre os modelos volumétricos testados, recomenda-se ajuste do proposto por Schumacher e Hall (1933), devido a superioridade em suas estimativas. Verificou-se que  $\pm 60\%$  dos erros associados ao emprego da equação volumétrica estão distribuídos entre as classes de erro de  $\pm 10$ . Foi observado, também pelo histograma, que o modelo volumétrico originou estimativas com pequenos viés. Apesar de ser comumente observado nos modelos de regressão, esse comportamento pode ter ocorrido em virtude do elevado número de árvores tortuosas e bifurcadas observadas no local.

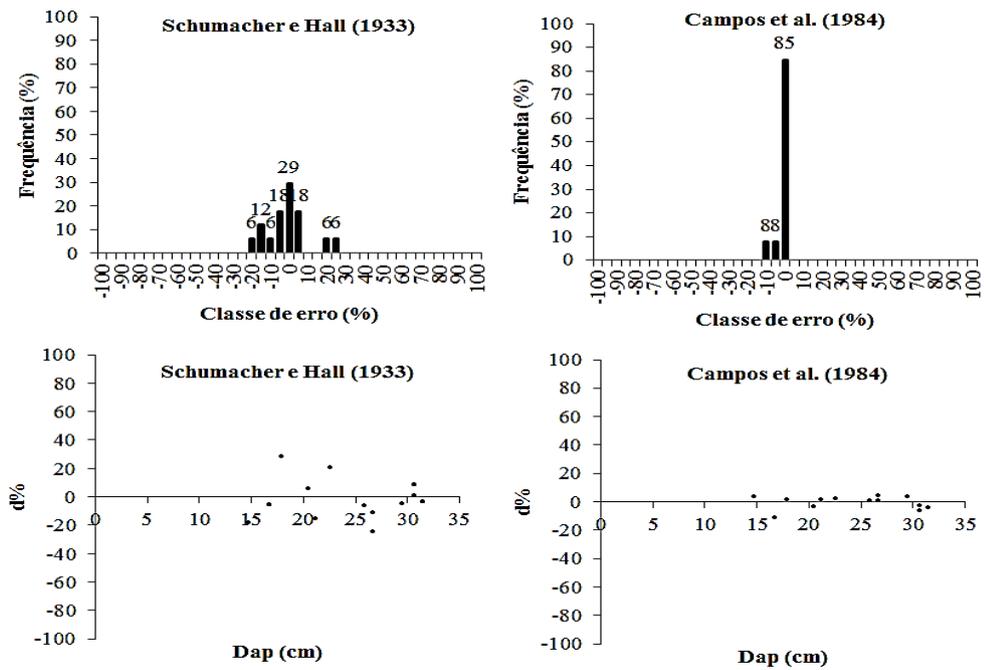


Figura 4. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste dos modelos volumétricos e hipsométricos para a localidade Cajuri, no arranjo espacial 11 x 3 m, aos oito anos idade.

Com relação às estatísticas de avaliação, observou-se que as estimativas geradas pelo modelo proposto Campos et al. (1984) foram consistentes e acuradas, demonstrando-se apropriadas para o local (Tabela 6). Observou-se, também, que o modelo volumétrico selecionado apresentou estimativas de boa precisão, com valores de RREQM de 11,96%,  $r_{y\hat{y}}$  0,9477 e DMA 0,06.

Tabela 6. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste dos modelos volumétricos e hipsométricos para a localidade Cajuri, no arranjo espacial 11 x 3 m, aos oito anos idade

Modelo	Parâmetros			RREQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$			
Schumacher e Hall (1933)	-8,1671*	0,7848 <sup>ns</sup>	1,5542*	11,96	0,9477	0,06
Campos et al. (1984)	4,3653*	-14,2785*	-0,1463 <sup>ns</sup>	4,21	0,9871	0,94

( $p < 0,05$ )\*; ( $p > 0,05$ )<sup>ns</sup>.

### 3.1.5 Coimbra

Para a localidade Coimbra, também não houve variações de arranjo espacial inicial e genótipo, não havendo necessidade da realização do teste estatístico de identidade de modelos.

A Figura 5 contém os resultados das estimativas geradas pelo ajuste dos modelos hipsométrico e volumétrico. O modelo hipsométrico demonstrou bom ajuste, com 87% da frequência dos erros entre as classes de  $\pm 10\%$ , seguidos de uma distribuição residual concentrada entre  $\pm 20\%$ . Já o modelo volumétrico selecionado para essa localidade foi o proposto por Schumacher e Hall (1933), que, apesar de ter sido observado alguns dados enviesados, demonstrou bom desempenho apresentando dispersão dos erros concentrada entre  $\pm 20\%$ , seguido de uma frequência de erro de 71% entre as classes de  $\pm 10\%$ .

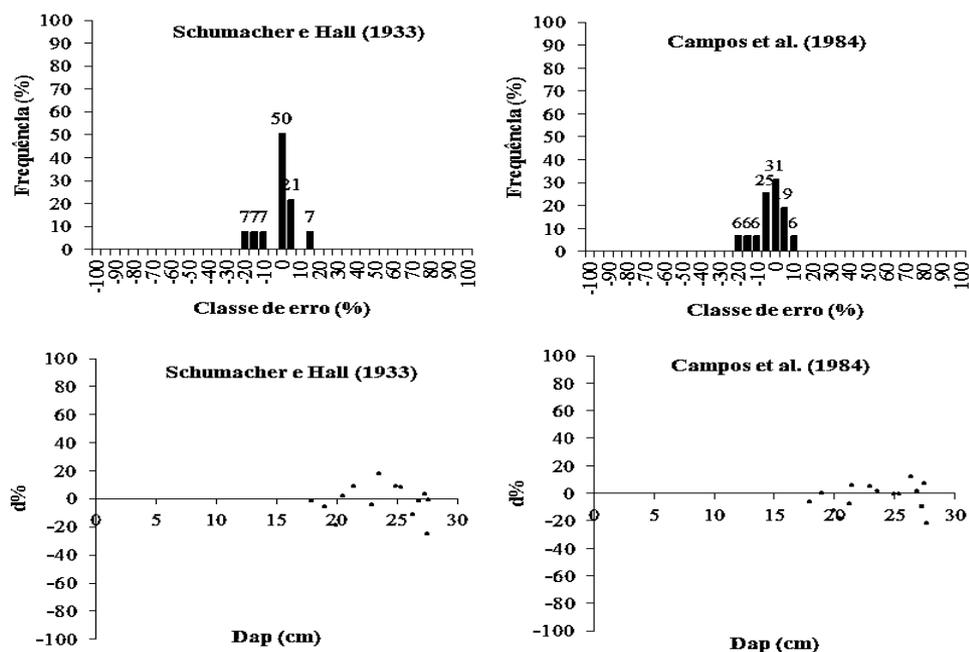


Figura 5. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste dos modelos volumétrico e hipsométrico para a localidade Coimbra, no arranjo espacial 12 x 3 m, aos seis anos e meio de idade.

Observou-se que o modelo volumétrico foi preciso, contudo, apesar da precisão e consistência demonstrada pelo modelo hipsométrico, as estatísticas de  $r_{y\hat{y}}$  e DMA foram um pouco inferiores, com valores de 0,6692 e 2,14 e respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste dos modelos volumétricos e hipsométricos para a localidade Coimbra, no arranjo espacial 12 x 3 m, aos seis anos e meio de idade

Modelo	Parâmetros			RQEQM (%)	$r_{yy}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$			
Schumacher e Hall (1933)	-8,7579*	1,5134*	0,9824*	11,81	0,9149	0,05
Campos et al. (1984)	4,3653 <sup>ns</sup>	-14,2785*	-0,1463 <sup>ns</sup>	9,04	0,6692	2,14

( $p < 0,05$ )\*; ( $p > 0,05$ )<sup>ns</sup>.

### 3.1.6 Modelos Gerais

Pelo teste F de Graybill, observou-se que não houve diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre o ajuste de equações específicas e equações gerais para as estimativas volumétricas e hipsométricas nas localidades estudadas.

A equação geral obtida com o ajuste do modelo proposto por Campos et al. (1984) resultou em estimativas de grande exatidão. Na Figura 6, observa-se que o modelo obteve 90% da frequência dos erros concentrados nas classes de  $\pm 10\%$ .

Em relação às equações volumétricas gerais testadas, constatou-se que o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) foi o mais indicado para os sistemas estudados. Entretanto, seu desempenho se mostrou inferior quando comparado com as equações específicas ajustadas por local. Os erros relativos percentuais ficaram distribuídos entre as classes de +45% a -60% (Figura 6).

Nesse caso, foi selecionada a metodologia que apresentou o melhor desempenho em termos estatísticos e gráficos. Assim, para gerar estimativas volumétricas em sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira, é recomendado que se ajuste o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933), específico por local, uma vez que esse método gerou estimativas de melhor exatidão.

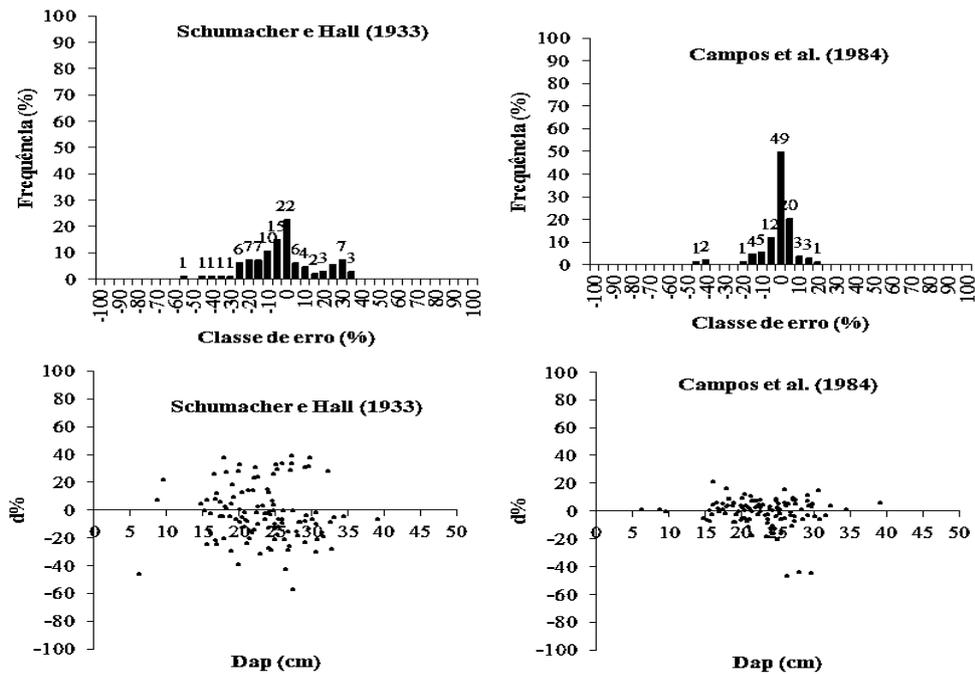


Figura 6. Distribuições de frequência, por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste das equações volumétricas e hipsométricas gerais para todas as localidades estudadas.

Ao se analisar as estatísticas de avaliação dos modelos gerais (Tabela 8), observou-se que o modelo de Campos et al. (1984) originou estimativas mais precisas do que em algumas localidades estudadas separadamente. Portanto, em virtude do bom desempenho apresentado e da simplificação dos procedimentos proporcionado pela equação hipsométrica geral, associado a um menor custo, constatou-se que este se adequou melhor aos sistemas agrossilvipastoris da região de estudo.

Em contrapartida, a equação volumétrica geral apresentou um desempenho inferior quando comparado com as equações específicas, uma vez que a estatística de RQEQM apresentou valor de  $\pm 27\%$ .

Tabela 8. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste das equações volumétricas e hipsométricas gerais para todas as localidades estudadas

Modelos Gerais	Parâmetros			RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$			
Schumacher e Hall (1933)	-9,3315*	1,3068*	1,4025*	26,99	0,8666	0,11
Campos et al. (1984)	1,8740*	-9,5639*	0,5595*	9,06	0,8884	1,82

( $p < 0,05$ )\*; ( $p > 0,05$ )<sup>ns</sup>.

### 3.1.7 Redes Neurais Artificiais

Após o ajuste e análise dos modelos de regressão para todas as localidades estudadas, foram treinadas RNA empregando os algoritmos Resilient Propagation e Skyp Layer. Posteriormente, selecionou-se a melhor rede apresentada para cada um desses algoritmos de treinamento.

Foi observada similaridade nos resultados, com ambos apresentando bons desempenhos, com estimativas volumétricas e hipsométricas livres de tendência (Figura 7 e 8).

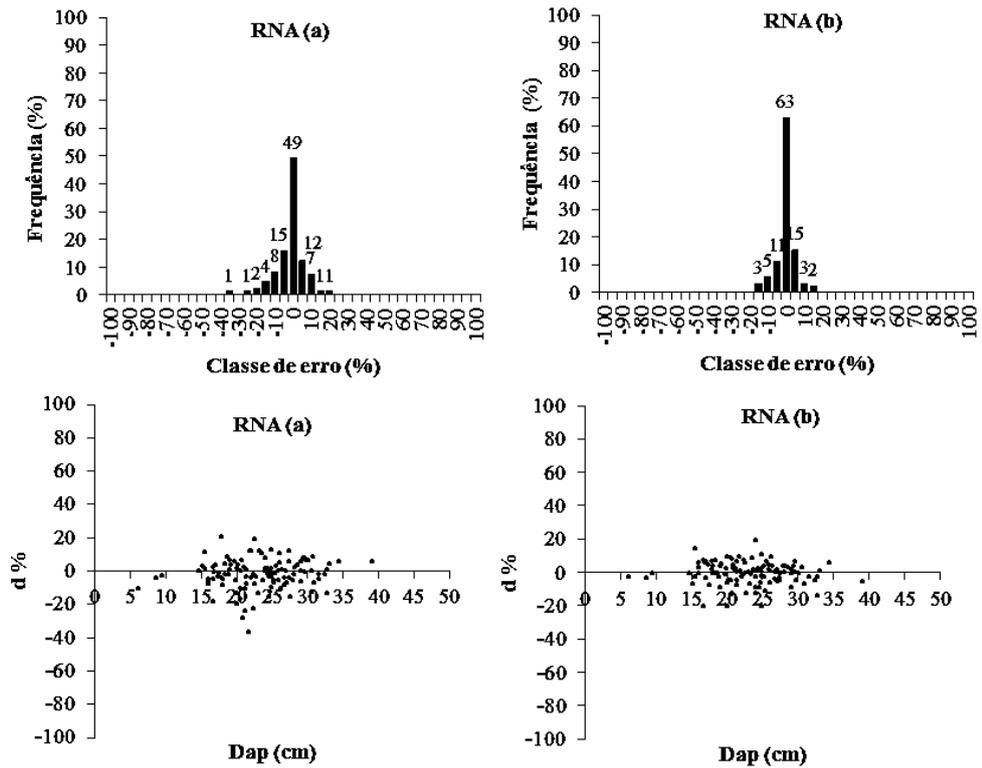


Figura 7. Distribuições de frequência, por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes às estimativas volumétricas (a) e hipsométricas (b) geradas pelas RNA utilizando o algoritmo Resilient Propagation para todas as localidades estudadas.

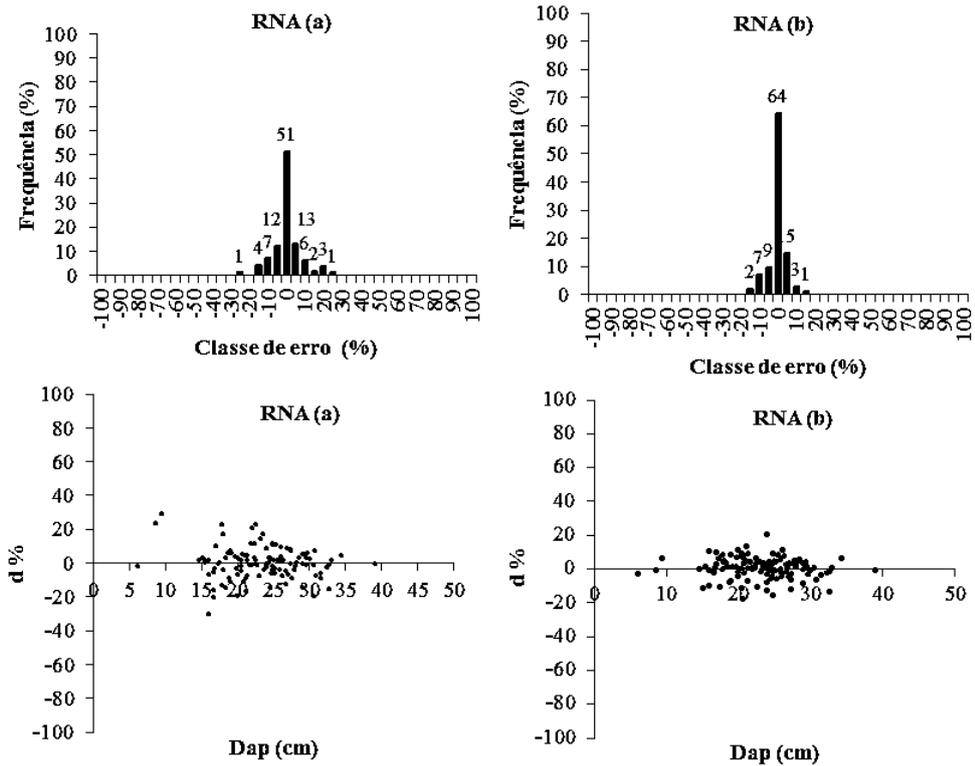


Figura 8. Distribuições de frequência, por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes às estimativas volumétricas (a) e hipsométricas (b) geradas pelas RNA utilizando o algoritmo Skyp Layer para todas as localidades estudadas.

O desempenho dos algoritmos testados foi similar tanto para gerar estimativas de altura quanto para volume (Tabela 9). Em média, as medidas de precisão apresentadas pelas RNA, para os dois algoritmos, foram satisfatórias, sendo para treino RQEQM de  $\pm 6\%$ ,  $r_{y\hat{y}}$  de  $\pm 0,97$ , e DMA  $\pm 0,53$ . Já para validação,  $\pm 9\%$ ,  $\pm 0,94$ , e  $\pm 0,96$ , respectivamente. No entanto, apesar da semelhança, observou-se ligeira superioridade por parte do algoritmo Skyp Layer, tanto para as estimativas hipsométricas quanto as volumétricas.

Tabela 9. Estatísticas referentes as estimativas de volumétricas e hipsométricas geradas pelas RNA utilizando os algoritmos Resilient Propagation e Skyp Layer.

Estimativa	Algoritmo	RQEQM (%)	$r_{\hat{y}y}$	DMA
Altura	<i>Resilient Propagation</i>	6,85	0,9463	1,29
Altura	<i>Skyp Layer</i>	5,96	0,9507	1,22
Treino	<i>Resilient Propagation</i>	5,29	0,9663	1,08
Treino	<i>Skyp Layer</i>	4,94	0,9693	0,98
Validação	<i>Resilient Propagation</i>	9,36	0,8908	1,79
Validação	<i>Skyp Layer</i>	8,13	0,8729	1,97
Volume	<i>Resilient Propagation</i>	8,36	0,9880	0,04
Volume	<i>Skyp Layer</i>	8,14	0,9887	0,04
Treino	<i>Resilient Propagation</i>	7,59	0,9913	0,03
Treino	<i>Skyp Layer</i>	6,51	0,9930	0,03
Validação	<i>Resilient Propagation</i>	9,88	0,9751	0,05
Validação	<i>Skyp Layer</i>	10,79	0,9789	0,05

As Figuras 9 e 10 contêm os histogramas e gráficos de dispersão residual, estratificados por localidade, resultantes das estimativas hipsométricas geradas pelo ajuste da equação de regressão geral e do treinamento da RNA empregando o algoritmo Skyp Layer.

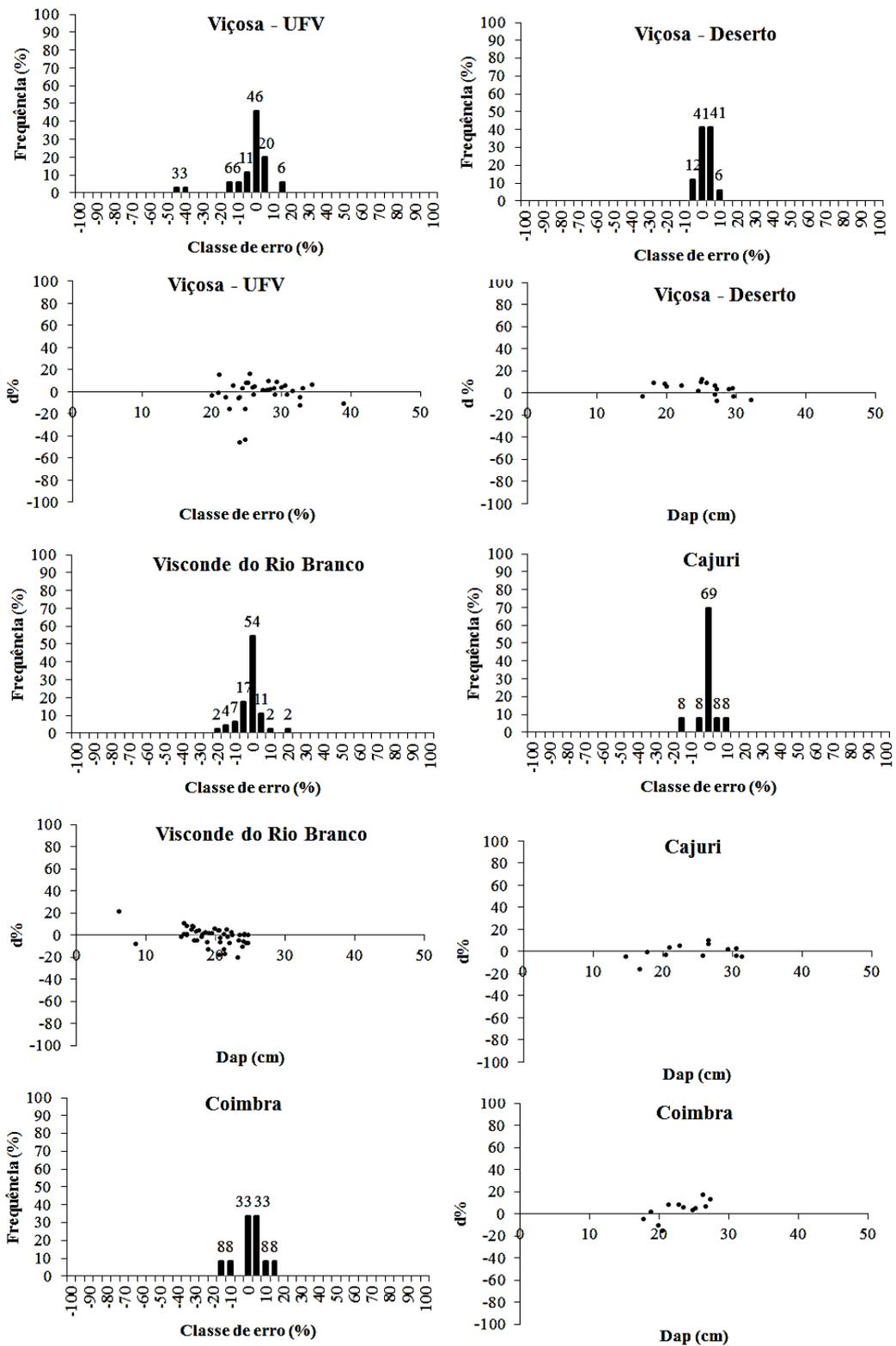


Figura 9. Distribuições de frequência, por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes as estimativas de altura geradas pela equação geral hipsométrica, por localidade.

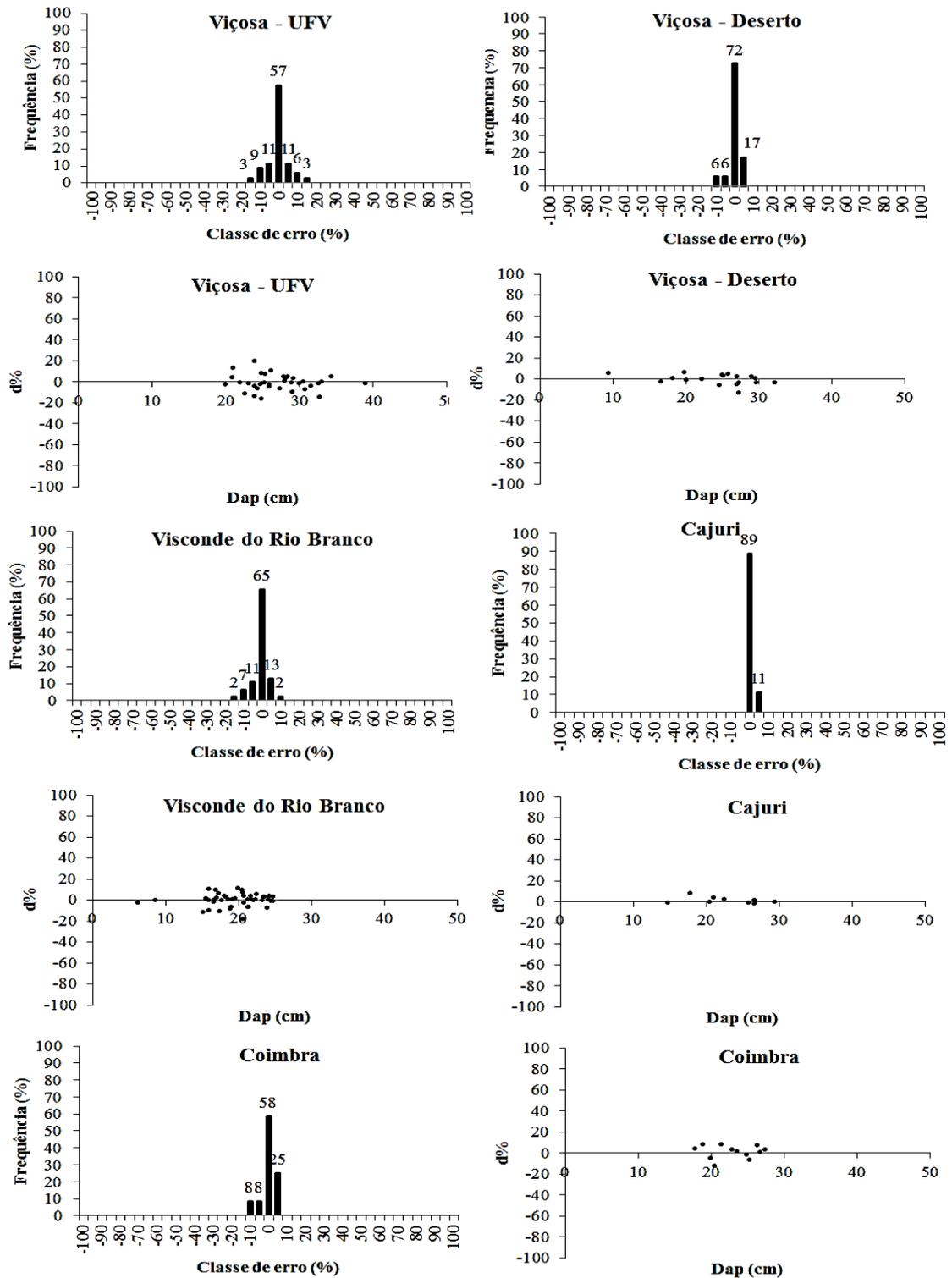


Figura 10. Distribuições de frequência, por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes as estimativas de altura geradas pela RNA, utilizando o algoritmo Skyp Layer por localidade.

Ao comparar o desempenho das estimativas de altura total geradas pelas RNA com as obtidas pela regressão selecionada, pode-se verificar que, apesar do desempenho satisfatório observado em ambas as metodologias, a rede treinada foi superior

apresentando maior frequência de erros concentrados nas classes de  $\pm 10\%$ , seguido de uma distribuição residual mais homogênea próxima ao eixo zero.

Quando se comparou o desempenho estatístico das estimativas de altura obtidas pela equação geral com o das RNA, verificou-se que ambos apresentaram valores de RREQM e DMA baixos. Isso implica boa acurácia dos métodos, posto que para essa última estatística, quanto mais próxima de zero a amplitude do erro estiver, melhor é a precisão do ajuste. Além disso, apesar do desempenho semelhante, os resultados gerados pelas RNA, em alguns casos, foram superiores ao do modelo hipsométrico geral.

Observando as curvas da relação diâmetro e altura na Figura 11, nota-se que o modelo geral hipsométrico proposto por Campos et al. (1984) é adequado para os sistemas agrossilvipastoris da região de estudo, pois consegue retratar as tendências de crescimento nas diferentes localidades de estudo de modo consistente.

Esta mesma observação é válida para a RNA selecionada, utilizando o algoritmo de treinamento Skyp Layer (Figuras 12)

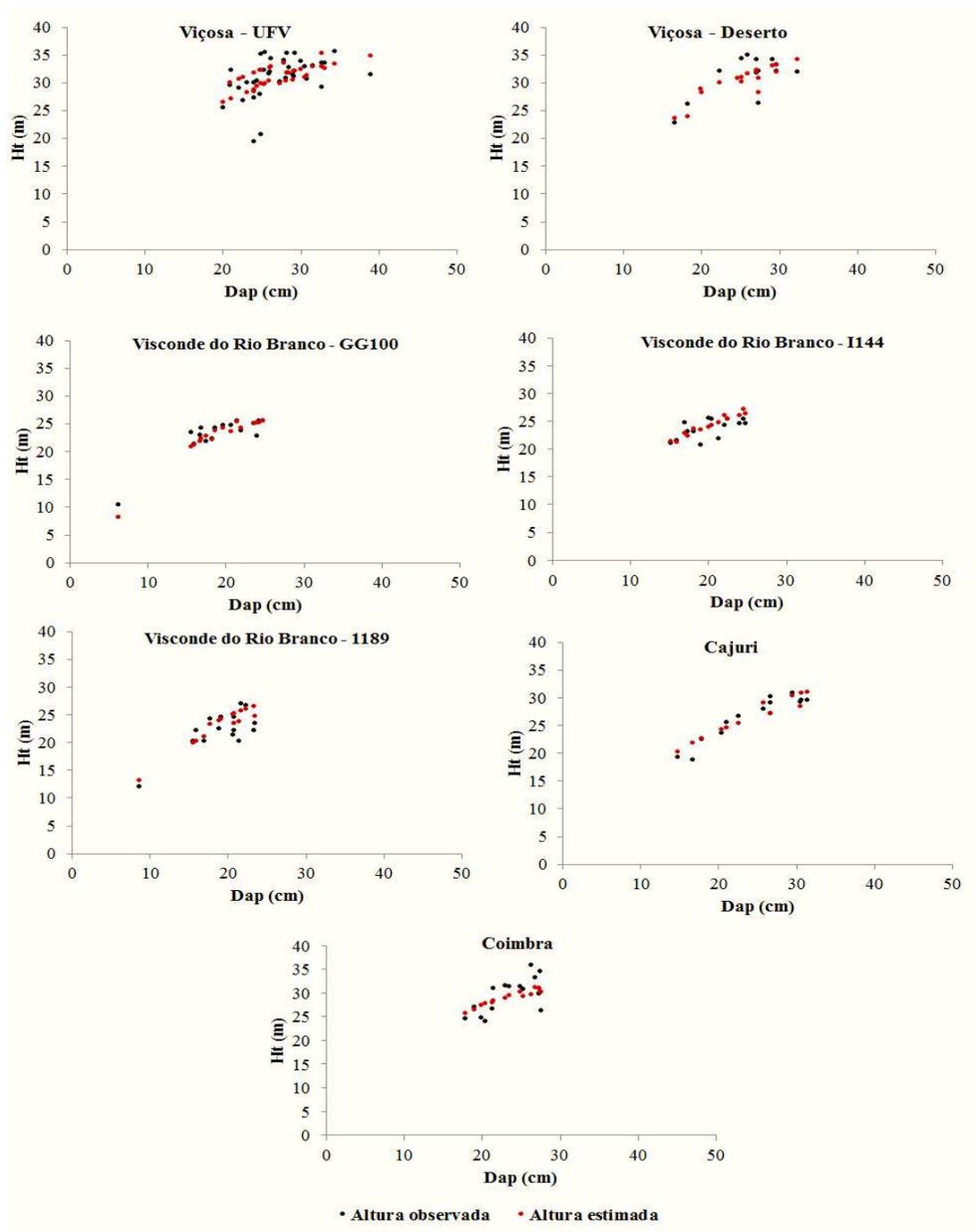


Figura 11. Curvas de altura, em função do dap, geradas pelas equações hipsométricas ajustadas por localidade, em sistemas agrossilvipastoris.

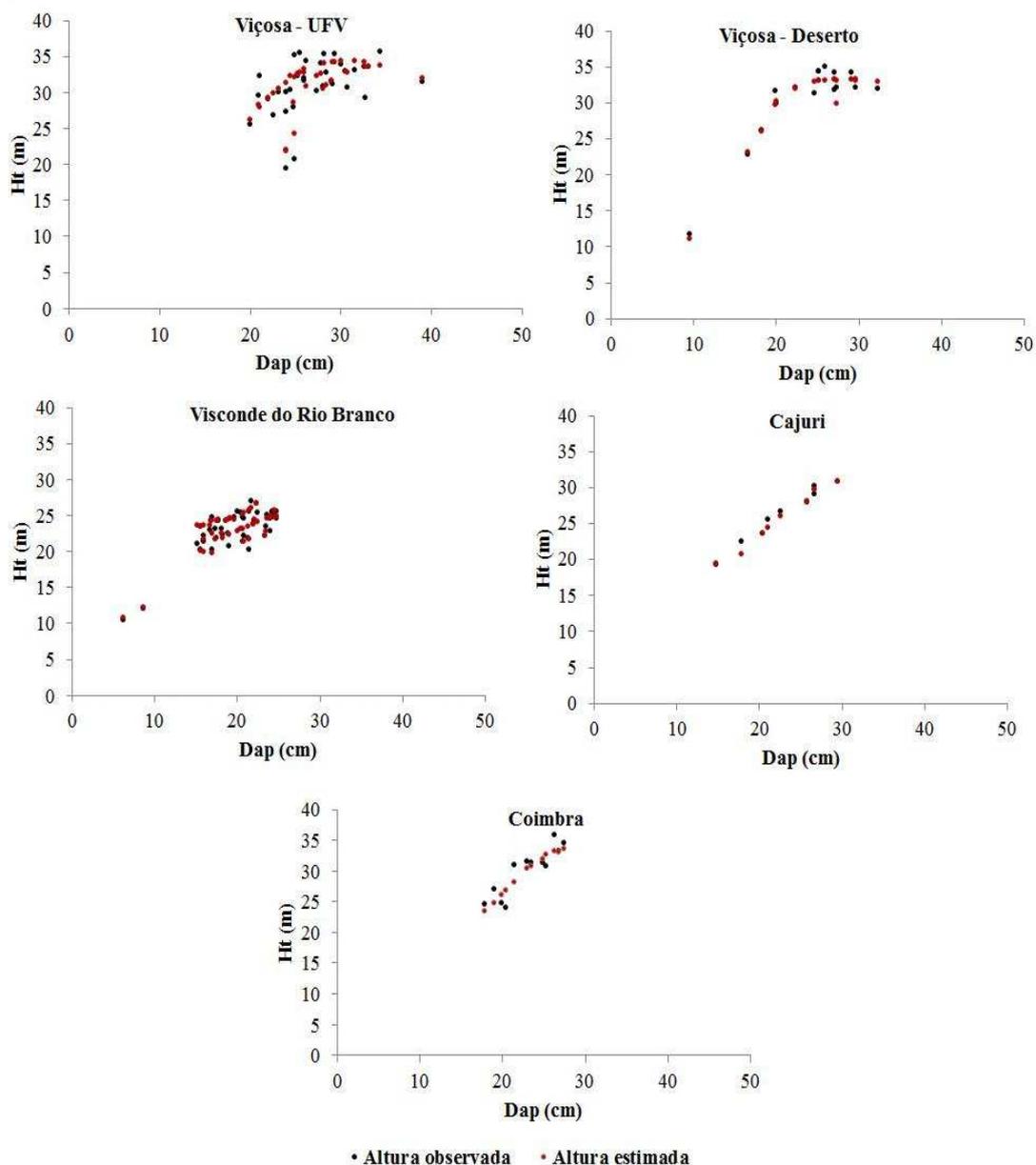


Figura 12. Curvas de altura, em função do dap, geradas pelas RNA utilizando o algoritmo Skyp Layer por localidade, em sistemas agrossilvipastoris.

Ao se analisar os histogramas e gráficos de dispersão de resíduos referentes às estimativas volumétricas estratificadas por localidade (Figuras 13, 14 e 15), verifica-se que as RNA obtiveram desempenho superior em três localidades, apresentando uma dispersão residual em torno de  $\pm 20\%$ , e histogramas com as maiores frequências dos erros concentradas nas menores classes.

Com relação ao método da regressão, observou-se que a equação volumétrica apresentou desempenho satisfatório, sendo considerado superior nas localidades de Coimbra e Viçosa - Deserto.

Contudo, as RNA, de um modo geral, conseguiram explicar melhor a variação existente nos dados de volume observado na maioria das localidades estudadas.

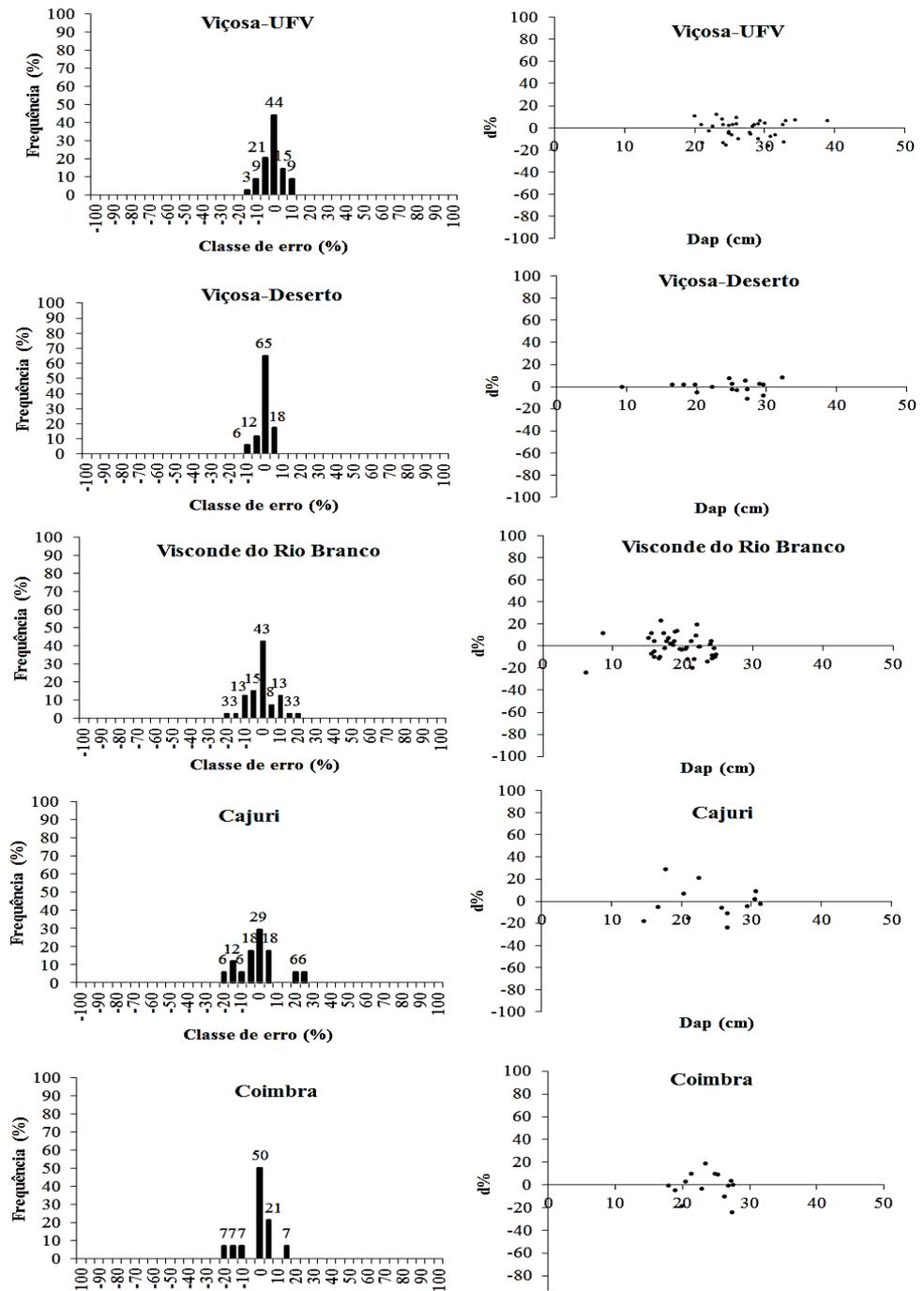


Figura 13. Distribuições de frequência, por classe de erro relativo percentual, e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes às estimativas de volume geradas pelas equações volumétricas, específicas por localidade.

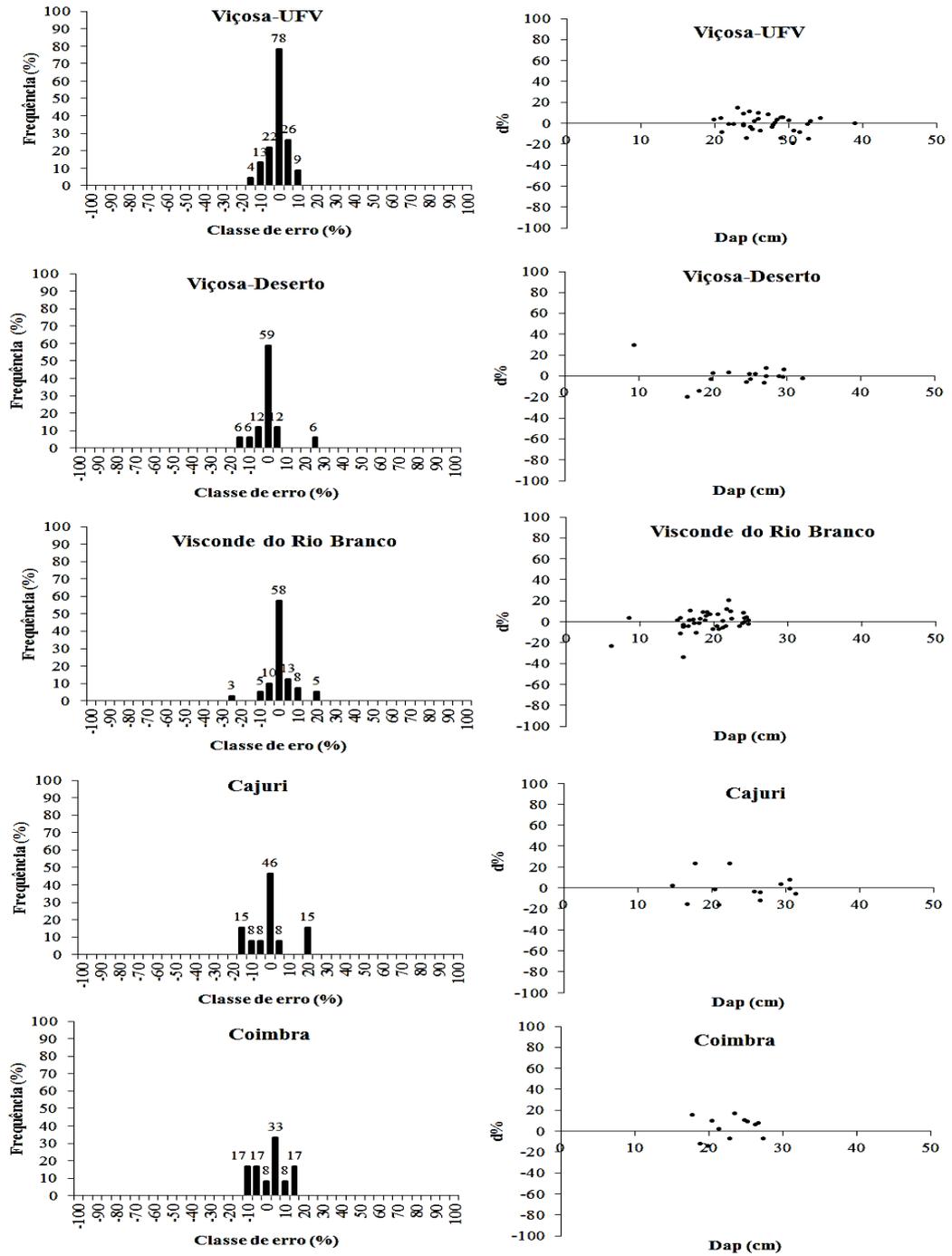


Figura 14. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais em função do dap referentes às estimativas de volume geradas pela RNA utilizando o algoritmo Skyp Layer por localidade.

A Figura 15 ilustra os desempenhos das curvas volumétricas em função do diâmetro, por localidade, obtidas através das equações de volume específicas. É possível notar que, para ambas as metodologias, a distribuição dos valores de volume estimado e observado em função do diâmetro das árvores apresentou a mesma tendência.

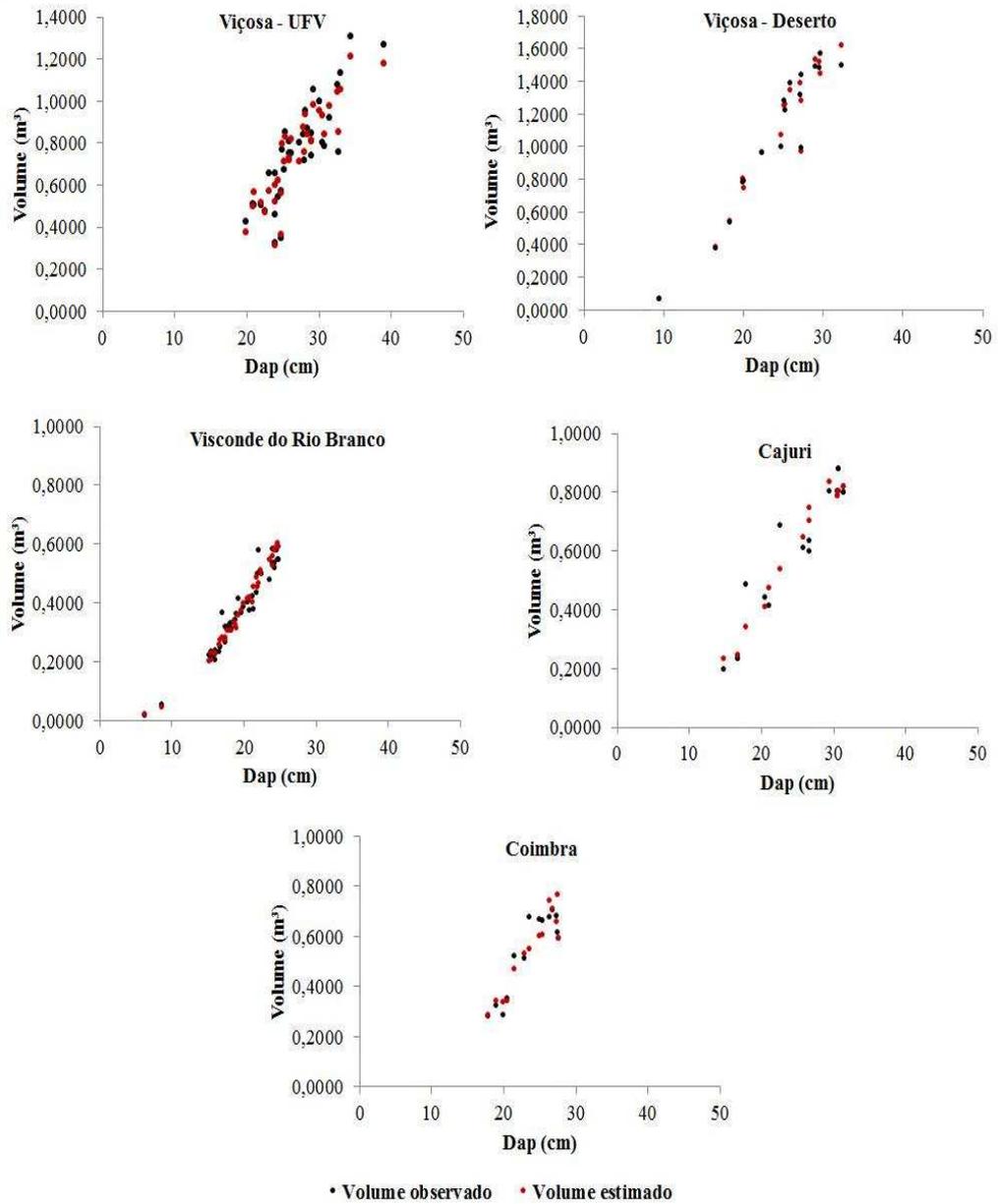


Figura 15. Curvas de volume em função do Dap geradas pelas equações volumétricas por localidade, em sistemas agrossilvipastoris.

Na Figura 16 são apresentadas as curvas volumétricas em função do diâmetro, por localidade, através da RNA empregando o algoritmo Skyp Layer.

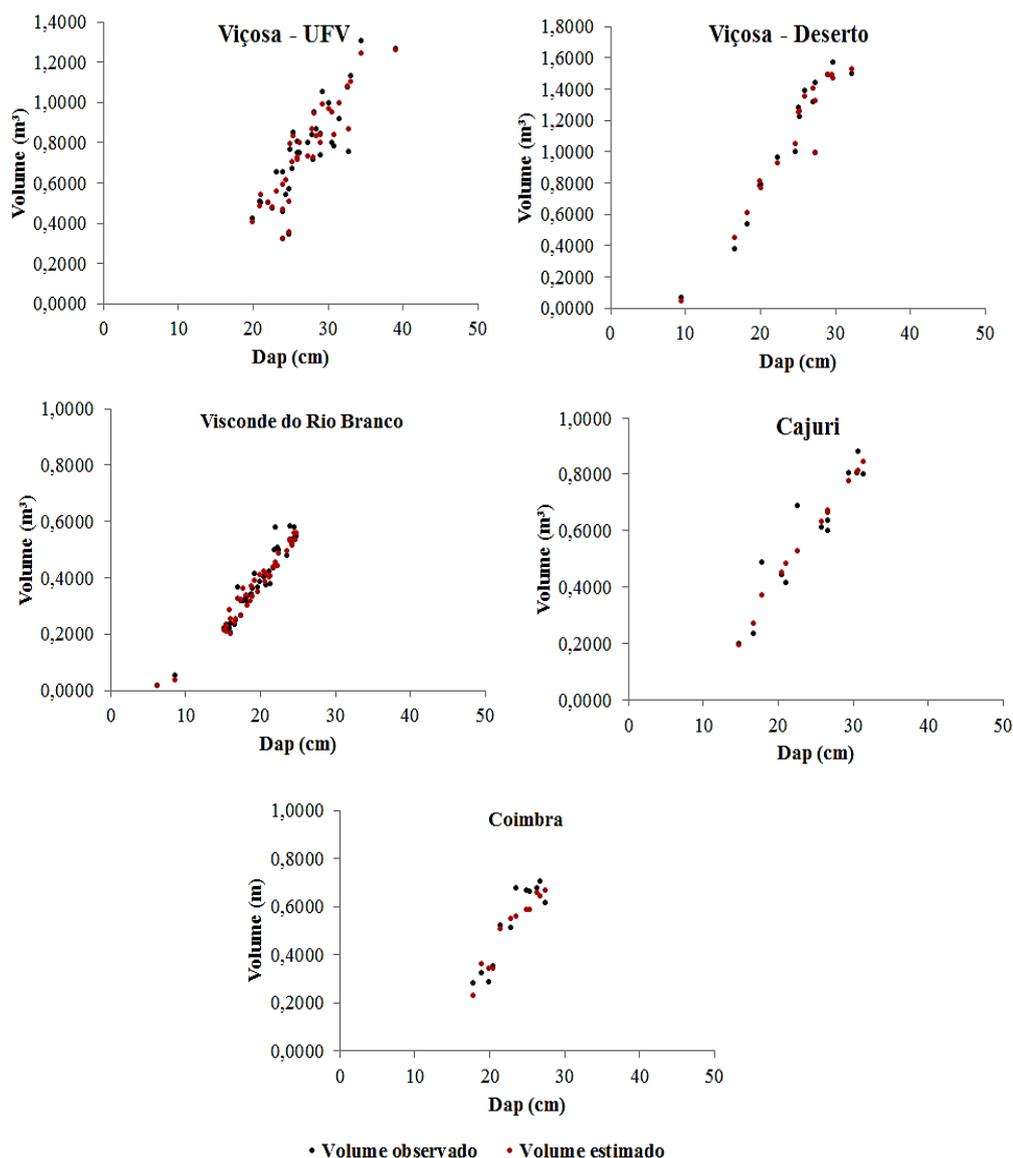


Figura 16. Curvas de volume em função do dap geradas pelas RNA utilizando o algoritmo Skyp Layer por localidade, em sistemas agrossilvipastoris.

Pelas Figuras 15 e 16 é possível notar que para ambas as metodologias a distribuição dos valores de volume estimado e observado em função do diâmetro das árvores apresentaram a mesma tendência.

Na Tabela 10 são apresentados os valores da produção volumétrica por hectare e o incremento médio anual (IMA) dos sistemas agrossilvipastoris estudados. Observou-se que os maiores valores de IMA foram encontrados nas localidades Viçosa-Deserto e Viçosa-UFV, ambos aos oito anos de idade.

Tabela 10. Produção volumétrica de árvores de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris localizados em municípios da região da Zona da Mata mineira.

Localidades	Arranjo espacial (m)	Idade (anos)	Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
Viçosa-UFV	12 x 4 e 12 x 2	8	246,80	30,85
Viçosa-Deserto	8 x 3	8	477,33	59,67
Visconde do Rio Branco	10 x 3	5,5	131,15	23,85
Cajuri	11 x 3	8	169,21	21,15
Coimbra	12 x 3	6,5	144,36	22,21

Entretanto, para a localidade de Cajuri, onde o sistema possuía esta mesma idade, verificou-se que a produtividade foi inferior (21,15 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), provavelmente decorrente da elevada taxa de mortalidade ocorrida no plantio, com replantio tardio.

Nas localidades Visconde do Rio Branco e Cajuri, observou-se que os valores de IMA foram próximos.

#### 4. DISCUSSÃO

Verificou-se para os sistemas agrossilvipastoris na localidade Viçosa-UFV que os arranjos espaciais não influenciaram no crescimento em altura, ou seja, não existe diferença entre o ajuste de uma equação hipsométrica geral e de uma específica por arranjo espacial. Diante disso, escolheu-se ajustar uma equação geral em virtude desta ter apresentado boa precisão, indicando a possibilidade de redução do custo de inventário.

Alguns trabalhos apontam efeitos significativos do arranjo espacial no crescimento em altura de eucalipto (LELES et al. 2001; MACEDO et al. 2006; OLIVEIRA et al. 2009; HARRINGTON et al. 2009). No entanto, Leite et al. (2006), estudando o efeito de arranjos espaciais sobre a altura em monocultivos de pinus, observaram que o arranjo espacial inicial influenciou pouco no crescimento em altura. Outras pesquisas encontraram resultados similares aos do presente estudo, tanto para SAFs quanto para monoculturas (LELES et al. 2001; MAGALHÃES et al. 2007; PAULA et al. 2013), reforçando a ideia de que não há uma tendência definida do arranjo espacial sobre a altura total das árvores.

Em relação às estimativas volumétricas, verificou-se que para localidade Viçosa - UFV não houve diferença ( $p > 0,05$ ) entre o ajuste de um modelo geral e modelos específicos

por arranjo espacial, ou seja, o arranjo espacial inicial de plantio não influenciou nas estimativas volumétricas. Para tanto, ajustou-se uma equação geral em virtude do seu bom desempenho e exatidão. No entanto, estudos indicam que, o arranjo espacial afeta diretamente no volume individual das árvores em virtude do maior crescimento radial nos plantios menos adensados (LEITE et al. 2006; ALCORN et al. 2007; OLIVEIRA et al. 2009; LIN et al. 2013).

Khan e Chaudrhy (2007) avaliaram o efeito dos arranjos espaciais 3,7 x 6,1 m, 3,7 x 9,1 m sobre o crescimento de *Populus deltoides*, no Paquistão e observaram maior crescimento radial nos arranjos espaciais menos adensados. Nesses mesmos arranjos, observou-se maior produção volumétrica por árvore, e menor volume por hectare, quando comparado com os arranjos mais adensados. Isso é uma tendência geralmente observada em plantios menos adensados em virtude do seu reduzido número de indivíduos (MAGALHÃES et al. 2007; OLIVEIRA et al. 2009; OLIVEIRA, 2014).

Entretanto, para a localidade de Visconde do Rio Branco foi observado que os diferentes genótipos influenciaram o crescimento em altura, indicando a necessidade do ajuste de equações hipsométricas específicas por genótipo. O crescimento em altura pode estar associado ao genótipo (BARBOSA, 2015), assim como a qualidade do local (CLUTTER, 1963).

Com relação ao desempenho estatístico dos modelos hipsométricos ajustados nas localidades, foram encontrados baixos valores de correlação. Segundo Barros et al. (2004), isso pode ser observado em plantios mais velhos que sofreram desbastes, o que pode ocasionar em baixa correlação entre as variáveis dap e a altura total.

Tal fato foi observado por Machado et al. (2011), que ajustaram diferentes modelos hipsométricos para árvores de pinus, no arranjo espacial inicial de 5 x 2,4 m. Esses autores também encontraram baixos valores para as estatísticas de coeficiente de determinação. Contudo, os erros padrões apresentaram valores consideráveis, em torno de  $\pm 10\%$ . Em contrapartida, Müller et al. (2014) avaliaram modelos de altura para árvores de acácia e eucalipto em sistema silvipastoril misto, no arranjo espacial 3 x 3 + 10 m, aos 10 anos de idade, na região da Zona da Mata mineira, e não verificaram ocorrência de baixa correlação hipsométrica.

Por outro lado, baixos valores de correlação também foram verificados em localidades que possuíam plantios mais jovens, como os de Visconde do Rio Branco e

Coimbra. Segundo Scolforo (2005), esse fato é comum entre os modelos de altura, uma vez que a correlação existente entre a altura e dap normalmente resultam em valores abaixo de 0,8. Outro fator que pode estar associado a estes resultados é que a obtenção da variável altura está sujeita a erros de medição, podendo ocasionar inconsistências.

O uso do modelo hipsométrico geral proposto por Campos et al. (1984), pode ser empregado para todas as localidades estudadas para estimar a altura de árvores de eucalipto em sistema agrossilvipastoril, sem perdas de precisão. A variável altura dominante contribuiu largamente com a acurácia do modelo. Segundo Campos e Leite (2013), modelos que utilizam variáveis como o índice local, a altura dominante e a idade, quase sempre podem apresentar estimativas mais precisas. Para esses autores, modelos como o utilizado no presente estudo têm sido largamente utilizados nos inventários florestais.

Ferreira (2009) e Oliveira et al. (2014) obtiveram resultados satisfatórios quando utilizaram o modelo proposto por Campos et al. (1984), como sendo a única equação hipsométrica testada em plantios de eucalipto, no sul da Bahia, com arranjo espacial inicial 5 x 2,4 m. Nessa mesma região, Ribeiro et al. (2010) também ajustaram uma equação geral utilizando este modelo, para um monocultivo de eucalipto. Estes autores salientam que o ajuste dos modelos gerais contribui para redução dos custos de inventário.

Diante disso, constatou-se que o modelo hipsométrico geral proposto por Campos et al. (1984) resultou em estimativas precisas, podendo ser recomendado para os plantios de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira, onde pequeno produtores possuem restrições financeiras para realização de inventários.

Com relação ao ajuste do modelo volumétrico geral, verificou-se que o modelo proposto por Schumacher e Hall apresentou melhor desempenho. Pelo teste de identidade proposto por Graybill (1976), observou-se que não havia diferença ( $p > 0,05$ ) entre o ajuste do modelo volumétrico geral e de modelos específicos por localidade. Entretanto, a equação geral estimada apresentou tendências subestimativas e superestimativas. Para tanto, recomenda-se o ajuste do modelo de Schumacher e Hall específico por localidade. A estratificação prévia dos dados contribuiu para maior precisão das estimativas, permitindo expressar melhor as tendências de crescimento do eucalipto nos SASPs.

Estudos envolvendo plantios de eucalipto e outras espécies arbóreas indicam a superioridade do modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) (SILVESTRE et al. 2014; MÔRA et al. 2014; SALES et al. 2015; SILVA et al. 2016). Para Campos e Leite

(2013), esse modelo tem sido muito difundido na área florestal, em virtude das suas propriedades estatísticas e de suas estimativas livres de tendências.

Mesmo com reduzido número de trabalhos que envolveram a modelagem em SAFs em Minas Gerais, a maioria desses registros utilizaram o modelo proposto Schumacher e Hall (1933) para gerar estimativas volumétricas (BARBOSA 2015; OLIVEIRA, 2014; MÜLLER et al. 2014; FONTAN et al. 2011).

Quando se comparou os resultados obtidos por meio das RNA com a regressão, observou-se que ambas metodologias se mostraram adequadas para geração das estimativas volumétricas e hipsométricas de eucalipto nos sistemas agrossilvipastoris.

Para Silva et al. (2016), isso é interessante no caso de plantações em pequena escala onde há restrição para o abate de árvores. Esses autores observaram que tanto o método da regressão quanto o método da RNA não necessitam de uma extensa base de dados de inventário (contendo um número árvores cubadas que gira em torno de 7 a 5 árvores-amostra por classe diamétrica) para poderem gerar suas estimativas bastando que houvesse representatividade nos mesmos.

Cordeiro et al. (2015), visando estimar o volume de diferentes clones de eucalipto, observaram que o uso das redes neurais pode se tornar um método alternativo ao emprego de equações volumétricas nos casos em que há necessidade do agrupamento dos dados em estratos, uma vez que essa metodologia possibilita redução no custo do inventário por meio da redução do número de árvores cubadas.

Para o treinamento das redes neurais artificiais não houve estratificação dos dados, diante da possibilidade de inserção de variáveis categóricas simultaneamente. Essas variáveis contribuíram para geração de resultados sem tendenciosidade e tão precisos quanto à regressão. De acordo com Leite e Andrade (2002), a estratificação dos dados remete a um maior ganho de precisão no ajuste dos mesmos, contudo pode acarretar no aumento de custos.

Independente do algoritmo de treinamento, as redes selecionadas apresentaram boa capacidade de aplicar o conhecimento adquirido no treinamento de dados desconhecidos, em outras palavras, as RNA apresentaram boa capacidade de generalização. Entretanto, de um modo geral, o algoritmo Skyp Layer apresentou estimativas volumétricas e hipsométricas levemente superiores ao Resilient Propagation.

Görgens et al. (2014) e Silva et al. (2009) realizaram uma análise comparativa entre as estimativas volumétricas geradas por redes neurais artificiais e pelo modelo de Schumacher e Hall (1933), e também constataram que as redes possuem boa capacidade de generalização.

Binoti et al. (2014) também compararam o desempenho do modelo proposto por Schumacher e Hall (1993) e redes neurais artificiais, e observaram desempenhos similares. Entretanto, estes autores ressaltaram que uma única RNA conseguiu explicar a variação das estimativas volumétricas existente em 53 modelos de regressão estratificados por genótipo, idade, arranjo espacial e projeto. Isso contribuiu para redução do tempo gasto com ajustes e seleção de melhores modelos.

No que diz respeito às estimativas hipsométricas, Binoti et al. (2013) concluíram que é possível estimar a altura de povoamentos de eucalipto por meio de redes neurais mantendo a mesma precisão das regressões tradicionalmente empregadas para este fim. Os autores salientam que apesar da similaridade dos resultados, as redes contribuíram com a redução dos custos do inventário, uma vez que possibilitou a redução das medições de altura. Por outro lado, resultados contraditórios foram observados por Diamantopoulou et al. (2012), quando as RNA treinadas apresentaram resultados superiores aos modelos hipsométricos não lineares testados. Vendruscolo et al. (2015) estimaram a altura de árvores de eucalipto na região sudeste do Mato Grosso e observaram que as redes neurais apresentaram valores estatísticos ligeiramente superiores ao método regressão.

Para fins deste estudo, constatou-se que ambas as metodologias apresentaram bons desempenhos para geração de estimativas hipsométricas e volumétricas de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris. Contudo, as estimativas hipsométricas geradas pelas RNA foram mais precisas do que aquelas da regressão. Em relação às estimativas volumétricas, verificou-se que, apesar da similaridade nos resultados, as RNA conseguiram demonstrar, na maioria dos casos, uma ligeira superioridade.

Diante disso, constata-se que as RNA foram mais adequadas para geração de estimativas volumétricas e hipsométricas nos sistemas agrossilvipastoris da região de estudo. O método das RNA possibilitou a redução da base de dados sem perdas de precisão e tendenciosidades nas estimativas. No caso da regressão é necessário um

determinado número de observações para que se atendam aos pressupostos de normalidade (GUJARATI e PORTER, 2011).

No que diz respeito às estimativas volumétricas, observou-se que o volume médio por hectare dos sistemas agrossilvipastoris estudados foi de 477,33, 297,78, a 169 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aos oito anos de idade. Salles et al. (2012), estudando um SAF aos oito anos de idade, no arranjo 10 x 4 m, com diferentes clones de eucalipto, localizado na região noroeste de Minas Gerais, encontraram um valor de volume médio por hectare de 193,35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Contudo, a região estudada por Salles et al. (2012) é caracterizada por um déficit hídrico acentuado em relação as localidades do presente estudo, podendo ter influenciado nas diferenças entre as médias volumétricas.

Com relação aos sistemas avaliados, observou-se um IMA de 59 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> aos 8 anos de idade, para localidade Viçosa - Deserto. É provável que estes resultados se justifiquem em virtude da boa adaptação do material genético e dos tratos culturais do sistema. Já no trabalho desenvolvido por Salles et al. (2012), o valor de IMA foi de 25 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nessa mesma idade.

Ao analisar os sistemas agrossilvipastoris estudados verificou-se que em Cajuri, aos 8 anos de idade, o sistema apresentou valor de IMA inferior aos encontrados nas localidades Viçosa-UFV e Viçosa-Deserto. Esse resultado pode ser justificado em virtude de elevado replantio e presença de árvores bifurcadas. Segundo Fontan et al. (2011), a boa condução e acompanhamento dos tratos culturais podem afetar na produtividade dos plantios de eucalipto em sistemas agroflorestais.

Os sistemas de Visconde do Rio Branco e Coimbra, com 5,5 e 6,5 anos de idade, respectivamente, apresentaram valores de produtividades de 23,85 e 22,21 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>. Kruschewsky et al. (2007) observaram IMA de 29,33 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, implantado em arranjo espacial 10 x 2 m, aos 5,5 de idade, na região noroeste de Minas Gerais. Tais resultados, reforçam as expectativas de influência do arranjo espacial do eucalipto na produtividade de madeira em sistemas agroflorestais.

## 5. CONCLUSÃO

As redes neurais artificiais desenvolvidas mostraram-se eficientes para estimação de altura e volume de árvores de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira, sendo, em alguns casos, superior à regressão. A RNA se torna vantajosa diante a possibilidade de redução da base de dados de inventário sem perdas de precisão. As produtividades do eucalipto em sistemas agrossilvipastoris variaram de 21 a 49 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCORN, P. J.; PYTTEL, P.; BAUHUS, J.; SMITH, R. G. B.; THOMAS, D.; JAMES, R.; NICOTRA, A. Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees. **Forest Ecology and Management**, v. 252, n. 1, p. 41-51, 2007.

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

BARBOSA, R. A. **Crescimento de clone de eucalipto em espaçamentos amplos com variação na distancia entre plantas na linha de plantio**. 2015. 37f. Dissertação (Mestrado em Ciencia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

BARROS, D. A. de; MACHADO, S. A.; ACERBI JÚNIOR, F. W. ; SCOLFORO, J. R. S. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em Diferentes Tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 45, n. 1, p. 03 - 28 2004.

BERNARDINO, F. S.; GARCIA, R. Sistemas silvipastoris. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.60, p.77-87, 2009.

BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L. M.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; SANTOS, F. L. Descrição da distribuição diamétrica de sistemas agrossilvipastoris utilizando as funções Weibull e Hiperbólica. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 349 - 356, 2012.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução do custo em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, n.1, p. 125-129, 2013.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; SILVA, A. L. A.; PONTES, C. Configuração de redes neurais para estimação do volume de árvores. **Ciência da Madeira**, v.5, n.1, p.58-67, 2014.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDEMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 260 p.

CAMPOS, J. C. C; RIBEIRO, J. O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento**: Minas Gerais. Brasília, DF: IBDF, 1984. 126 p.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 548p.

CARDOSO, D. J.; LACERDA, A. E. B; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZÚ, M. C.;LIMA, R. T. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, n. 310, p.761-769, 2013.

CASTRO, R. V. O. ; CUNHA, A. B.; SILVA, L. V.; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de *Eucalyptus* utilizando dois métodos para quantificação do índice de local. **Scientia Forestalis**, v.43, n.105, p. 83-90, 2015.

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

CORDEIRO, M. A.; PEREIRA, A. R. S.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para quantificação volumétrica de árvores de eucalipto no Estado do Amapá. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 15 , n. 1, p. 48-58, 2015.

CORREA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração de argila de solos de planalto de Viçosa-Mg**. 1984. 187f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1984.

CURI, N.; CARMO, D. N.; BAHIA, V. G.; FERREIRA, M. M.; SANTANA, D. P. Problemas relativos ao uso, manejos e conservação dos solos em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 16, n. 176, p. 5-16, 1992.

CURTIS, R.O.; MARSHALL, D. D. Why quadratic mean diameter? **Western Journal Applied Forestry**, v.15, n.3, p.137-139, 2000.

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.; OZÇELIK, R.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, U. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods. **Biosystems Engineering**, v. 133, p. 33-45, 2015.

DUBÉ, F.; COUTO, L.; GARCIA, R.; ARAÚJO, G. A. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. Avaliação de um sistema agroflorestal com Eucalyptus sp. no estado de Minas Gerais: o caso da companhia mineira de metais. **Revista Árvore**, v.24, n.4, p. 437-443, 2000.

FERREIRA, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de Eucalyptus sp**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2009.

FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; MOSQUERA-LOSADA, M. R. Response to sewage sludge fertilization in a Quercus rubra L. silvopastoral system: Soil, plant biodiversity and tree and pasture production. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 141, n. 1-2, p. 49-57, 2011.

FONTAN, I. C. I.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; MONTE, M. A.; RAMOS, D. C.; SOUZA, F. C. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 83, n.2, p. 121 - 131, 2011.

FREITAS, E.C.S.; OLIVEIRA NETO, S.N.; FONSECA, D.M.; SANTOS, M.V.; LEITE, H.G.; MACHADO, V.D. Deposição de serapilheira e nutrientes no solo em sistemas agrossilvipastoris com eucalipto e acácia. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.409-417, 2013.

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

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

GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerias para reflorestamento**. Belo Horizonte: CPFRC, 65p. 1975. (Série Técnica, 3).

GÖRGENS, E. B.; LEITE, H.G.; GLERIANI, J. M.; SOARES, C.P.B.; CEOLIN, A. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individual por meio de redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, v. 38, n.2, p.289-295, 2014.

GRAYBILL, F.A. **Theory and application of the linear model**. Massachussetts: Duxbury Press, 1976. 704p

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**, 5. ed. Bookman: Porto Alegre, 2011.

HARRINGTON, T. B.; HARRINGTON, C. A.; DEBELL, D. S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationships of Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii* var. *menziesii*). **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 1, p. 18–25, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA.(IBGE) Disponível em : <http://cidades.ibge.gov.br/> Consultado em 11 de junho de 2016.

KHAN G.S.; CHAUDHRY A. K. Effect of spacing and plant density on the growth of poplar (*Populus deltoides*) trees under agro-forestry system. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v.44, n.2, p.321–327, 2007.

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. **Cerne**, v. 13, n. 4, p. 360-367, 2007.

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

LEITE, H. G.; BINOTI, M.L.M.S.; BINOTI, D.H.B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F.I. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* L. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v.130, n.2, p.263-269, 2011.

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

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

LIN, Y.; YANG, H.; IVKOVIC, M.; GAPARE, W. J.; MATHESON, A. C.; WU, H. X. Effect of genotype by spacing interaction on radiata pine genetic parameters for height and diameter growth. **Forest Ecology and Management**, v. 304, p.204 -211, 2013.

MACEDO, R. L. G.; BEZERRA, R. G.; VENTURIN, N.; VALE, R. S.; OLIVEIRA, T. K. Desempenho silvicultural de clones de eucalipto e características agrônômicas de milho cultivados em sistema silviagrícola. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 701-709, 2006.

MACHADO, S. A.; BARROS, D. A.; SCOLFORO, J. R.; ACERBI JÚNIOR, F. W. The effects of successive thinning on the hypsometric function for *Pinus oocarpa* stands. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 397 - 406, 2011.

MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARCOVERDE, G. F. B.; HANSEN, M. C. Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, n. 4, p. 265-272, 2009.

MAGALHÃES, W. M; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N; HIGASHIKAWA, E.M.; JUNIOR, M. Y. Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais. **Cerne**, v. 13, n. 4, p. 368-375, 2007.

MARTINS, T.P.; RANIERI, V.E.L. Sistemas agroflorestais como alternativa para as reservas legais. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 3, p. 79-96, 2014.

MENDONÇA, R. A.; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F.; SOUZA, A. L.; TRUGILHO, P. F.; CARVALHO, S. P. C.; POSSATO, E. L. Modelagem da produção de sortimentos em povoamentos de eucalipto. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 587-594, 2014.

MÔRA, R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; MIRANDA, R. O. V. Modelos para estimativas volumétricas de *Pinus taeda* L. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19, p. 1320-1332, 2014.

MÜLLER, M. D. ; SALLES, T.T.; C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; BRIGHENTI, A.M.; CASTRO, C. R. T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, v. 44, n.3, p. 473 - 484, 2014.

NAIR, P. K. R. Classification of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 3, n. 2, p. 97-128, 1985.

NASCIMENTO, M. C.; RIVA, R.D.D.; CHAGAS, C. S.; OLIVEIRA, H.; DIAS, L.E.; FILHO, E.I.F.; SOARES, V.P. Uso de imagens do sensor ASTER na identificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p.196-202, 2006.

OLIVEIRA, C. H. R. **Produção de eucalipto em alto fuste e talhadia e de braquiária em sistemas silvipastoris com diferentes arranjos espaciais**. 2014. 2016 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

OLIVEIRA, F. L. R.; CABACINHA, C. D.; SANTOS, L. D. T.; SANTOS JUNIOR, A.; BRANT, M. C.; SAMPAIO, R. A. Crescimento inicial de eucalipto e acácia em diferentes arranjos de Integração - Lavoura - Pecuária - Floresta. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 227- 233, 2015.

OLIVEIRA, L. T.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T.; FERRZA FILHO, A. C.; OLIVEIRA, T. C. A.; SILVEIRA, E. M. O.; ACERBI JUNIOR, F. W. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por scanner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.9, p.692-699, 2014.

OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural e produtivo de eucalipto sob diferentes arranjos espaciais em Sistema Agrossilvipastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.1, n.60, p, 01-09, 2009.

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, U. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. **Forest Ecology and Management**, v. 306, p. 52-60, 2013.

PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H.G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUSA, F. C. Eucalypt growth in monoculture

and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, v.87, n.6, p.1285-1307, 2013.

Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p.

RADAMBRASIL, Projeto. Levantamento de Recursos Naturais: Folha SF.23/24 Rio/Vitória. Rio de Janeiro: Projeto RADAMBRASIL, 1983. 780p.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v.16, n. 1, p. 22-31, 2010.

RODRIGUES, E. F.; OLIVEIRA, T. F.; MADRUGA, M. R.; SILVEIRA, A. M. A. Um método para determinar o volume comercial de *schizolobium amazonicum* (huber) ducke utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v.28, n.1, p.16-23, 2010.

SALES, F. C. V.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. L. Ajustes de modelos volumétricos para o clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 663 – 67, 2015.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SOARES, C. P. B.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n.2, p. 253 - 260, 2012.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. ; OLIVEIRA, J. B. ; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

SARAIVA D. T.; FERREIRA, R. L.; TEIXEIRA, C. C.; GOMES, R. J.; OLIVEIRA NETO, S. N.; TORRES, C. M. M. E. Extension events of integrated crop-livestock-forest in the Zona da Mata Mineira, Brazil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA, 2015. **Anais...** Brasília: 2015. Disponível em <http://wcclf2015.com.br/anais/busca/index.php?lang=pt>. Acesso em: 10 \08 \2015

SCHIKOWSKI, A.B.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, A. R. Estudo da forma do fuste utilizando redes neurais artificiais. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 35, n. 82, p. 119-127, 2015.

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

SCOLFORO, J.R.S.; **Biometria florestal**: Parte I: Modelos de regressão linear e não linear; Parte II: Modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

OLIVEIRA, G.P.; SIQUEIRA, D. L.; SILVA, D. F. P.; MATIAS, R. G. P.; SALOMÃO, L. C. C. Caracterização de acessos de mangueira Ubá na Zona da Mata mineira. **Ciência Rural**, v.43, n.6, p.962-969, 2013.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 34, n. 2, p. 575-585, 2010.

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**, v.33, n.6, p.1133-1139, 2009.

SILVA, L. F.; FERREIRA, G. L.; SANTOS, A. C. A.; LEITE, H.G.; SILVA, M. L. Equações hipsométricas, volumétricas e de crescimento para *Khaya ivorensis* plantada em Pirapora. **Floresta e Ambiente**, v.15, n.6, p.36-47, 2016.

SILVA, S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; OBOLARI, A. M. M.; SCHETTINI, B.L.S. Avaliação do uso da regressão e de redes neurais artificial em sistema silvipastoril para a modelagem do afilamento do fuste de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**. v. 13, n.23, p. 189-199, 2016.

SILVEIRA, D. P.; LEITE, H. G.; SILVEIRA, V. P.; MELIDO, R. C. N. Classificação de árvores de eucalipto para postes em sistemas agroflorestais. **Revista Árvore**, v.35, n.4, p.875-872, 2011.

SILVESTRE, R.; BONAZZA, M.; STANG, M.; LIMA, G. C. P.; KOEPEL, D. A.; MARCO, F. T.; CIARNOSCHI, L. Dom; SCARIOT, R.; MORÊS, D. F. Equações volumétricas em povoamentos de Pinus taeda L. no município de Lages-SC. **Nativa**, v.2, n.1, p. 01-05, 2014.

STATSOFT, I. N. C. STATISTICA (data analysis software system), version 13. **Tulsa, USA**, v. 150, 2016.

THOMAS, C.; ANDRADE, C.M.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. 2006. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, v.16, n. 3, p. 319-327, 2006.

VALE, R. S.; COUTO, L.; SILVA, M.L.; GARCIA, R.; ALMEIDA, J.C. de C. LANI, J. L. Análise da viabilidade econômica de um sistema silvipastoril com eucalipto para a Zona da Mata de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, v.1, n.2, p.107-120, 2004.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R., SOUZA, H. S.; MOURA, J, P. V. M.; MAMORÉ, F. M. D.; SIQUEIRA, T. A. S. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v.33, n.4, p.556-569, 2015.

## CAPÍTULO II

### **REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR O AFILAMENTO DO FUSTE DE EUCALIPTO EM SISTEMAS AGROSSILVIPASTORIS NA REGIÃO DA ZONA DA MATA MINEIRA**

#### **RESUMO**

SILVA, Simone, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2016. **Redes neurais artificiais para estimar o afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira.** Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientador: Helio Garcia Leite.

Este estudo teve como objetivo estimar o afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris, na Zona da Mata mineira, comparando modelos de regressão e redes neurais artificiais e analisar o potencial de multiprodutos da madeira em um sistema agrossilvipastoril. Os dados foram provenientes de cinco sistemas agrossilvipastoris, localizados em quatro municípios, com diferentes arranjos espaciais (8 x 3 m, 10 x 3 m, 11 x 3 m, 12 x 3 m, 12 x 2 m e 12 x 4 m), idades (5,5; 6,5 e 8 anos) e genótipos (GG100, 3336, CRV 1189 e I144), para os quais foram cubadas 122 árvores-amostra. Foram ajustados os modelos de afilamento do fuste propostos por Garay (1979), Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972) e Ormerod (1973), considerando todos os dados e a estratificação dos mesmos por localidade, arranjo espacial e genótipo. Foram aplicados testes de identidade para verificar a viabilidade de ajuste de uma equação geral e equações específicas. Foram treinadas redes neurais artificiais (RNA) do tipo Multilayer Perceptron, utilizando como variáveis categóricas o arranjo espacial, a localidade e os genótipos. As demais variáveis de entrada contínuas foram o diâmetro à altura do peito - 1,30 m de altura (dap), altura total (Ht), alturas de cada seção nos respectivos diâmetros (h) e as idades. A precisão dos métodos foi avaliada por meio das estatísticas da raiz do erro quadrático médio, correlação entre diâmetros observados e estimados, dispersão dos erros percentuais, e o desvio médio absoluto. A simulação dos multiprodutos da madeira no sistema agrossilvipastoril avaliado foi realizada para o arranjo espacial 12 x 4 m. Foram considerados quatro potenciais usos da madeira (serraria, lenha, mourão 1 - 8 a 12 cm e mourão 2 -12 a 15 cm), visando multiprodutos, cujas receitas foram comparadas considerando-se a madeira somente para lenha. O modelo de Garay foi o que apresentou melhor precisão para geração das estimativas de afilamento do fuste nos sistemas agrossilvipastoris. A RNA apresentou desempenho superior ao

modelo de regressão de afilamento selecionado, demonstrando ser uma metodologia eficiente para estimar o afilamento do fuste. O potencial de renda proveniente da madeira do sistema agrossilvipastoril foi superior quando destinada para multiprodutos, em comparação com o uso exclusivo para lenha.

**Palavras-chave:** Sistema agroflorestal; eucalipto, taper, sortimento.

## 1. INTRODUÇÃO

A pecuária tradicional é uma prática que vem sendo utilizada durante muitos anos por pequenos produtores rurais da Zona da Mata mineira (VALE et al. 2004). Contudo, devido ao uso intensivo da terra e o manejo inadequado, essa atividade contribuiu para a degradação dos solos, e conseqüentemente na perda da fertilidade e da produtividade, tornando-se uma das principais causas da degradação das pastagens (FRANCO et al. 2002).

Diante disso, os sistemas agrossilvipastoris (SASPs) e silvipastoris (SSPs), que são modelos de sistema agroflorestal (SAF), têm-se tornado uma alternativa potencial para a recuperação das pastagens degradadas. Tais sistemas são definidos como técnicas de uso do solo onde ocorre a integração de pastagens, espécies arbóreas, culturas agrícolas e animais em um mesmo local (NAIR, 1985).

A prática agroflorestal pode gerar benefícios sociais, econômicos e ambientais, como conservação do solo, maior ciclagem de nutrientes (FREITAS et al. 2013), diversificação da produção e da renda (VALE et al. 2004), conforto térmico para animais, entre outros. (PERES et al. 2010).

A adoção destes sistemas vem despertando o interesse de agricultores da Zona da Mata mineira (SARAIVA et al. 2015), que dispõe de linhas de financiamento como o Programa Nacional de Agricultura Familiar (PRONAF) e o Programa de Agricultura de Baixo Carbono (PLANO ABC).

Outro fator importante em relação aos sistemas agroflorestais seria a possibilidade de maior lucratividade, quando as árvores são destinadas a multiprodutos (MÜLLER et al. 2011; SILVEIRA et al. 2011; SILVA et al. 2016). Assim, a determinação do sortimento de madeira auxiliaria o produtor rural na sua tomada

decisão, com base nas receitas advindas dos diversos produtos extraídos das árvores (MENDONÇA et al. 2015).

A geração de multiprodutos, ou sortimento da madeira, pode ser feita com auxílio de modelos estatísticos de afilamento de fuste ou taper (CAMPOS & LEITE, 2013). De acordo com esses autores, os modelos de afilamento estimam o diâmetro em qualquer posição do fuste através de variáveis dendrométricas, como diâmetro a 1,30 m do peito (dap), altura total (Ht), e posição do diâmetro ao longo do fuste (h). Outra vantagem associada ao uso desses modelos é que permitem estimar o volume comercial de madeira e a altura em qualquer posição do tronco das árvores (SOARES et al. 2006; LEITE et al. 2006; SOUZA et al. 2016).

Existem vários tipos de modelos de afilamento que podem ser divididos em segmentados e não segmentados (CAMPOS & LEITE, 2013). Dentre o grupo dos modelos segmentados, pode-se citar os modelos propostos por Max & Bukhart (1975), Demaerchalk e Kozak (1977) e Parresol et al. (1987). Já no grupo dos modelos não segmentados, tem-se os modelos propostos por Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973), Biging (1984), Prodan (1965) e Garay (1979). Segundo Souza et al. (2016), os modelos propostos por Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972) e Garay (1979) são os mais difundidos.

Outra forma de se obter estimativas do afilamento do tronco é através de redes neurais artificiais (RNA) (DIAMANTOPOULOU, 2005; GÖRGENS et al. 2009; SOARES et al. 2011; BINOTI et al. 2012; ÖZÇELIK et al. 2013 ; GÖRGENS et al. 2014; BINOTI et al. 2014; DIAMANTOPOULOU et al. 2015).

Estudos envolvendo a modelagem do perfil do fuste por meio de regressão foram conduzidos em árvores de eucalipto, assim como para outras espécies arbóreas (LEITE et al. 2011, SILVA et al. 2011; SOARES et al. 2011; FAVALESSA et al. 2012). No entanto, em árvores em sistemas agroflorestais, quando podem estar dispostas em arranjos espaciais mais amplos, são escassos, porém importantes, uma vez que as árvores assumem uma forma do fuste menos cilíndrica em relação às dos monocultivos florestais (SILVA et al. 2016).

Alguns estudos de afilamento do fuste em sistemas agroflorestais com eucalipto foram realizados em Minas Gerais. Silveira et al. (2011) classificaram árvores de *Eucalyptus camaldulensis* para postes em sistema agrossilvipastoril, empregando o

modelo proposto por Garay (1979). No âmbito da região da Zona da Mata mineira, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Müller et al. (2011), que ajustaram o modelo proposto por Demaerschalk (1972) para árvores de eucalipto e acácia em sistema agrossilvipastoril misto, no arranjo espacial 3 x 3 + 30 m, visando diferentes alternativas de comercialização da madeira do segundo desbaste. Ainda nesse mesmo sistema, Müller et al. (2014) testaram modelos segmentados e não segmentados para estimar o afilamento do tronco das árvores e concluíram que os modelos não segmentados de Max & Bukhart (1977) e Parresol et al. (1987) geraram melhores estimativas do perfil do fuste.

Com relação às redes neurais artificiais, trabalhos que utilizaram este método para modelagem do perfil do fuste de eucalipto em sistemas agroflorestais na região da Zona da Mata são escassos, destacando-se o de Silva et al. (2016). Neste estudo, os autores constataram que as RNA demonstraram ser uma ferramenta apropriada para análises do perfil do fuste, inclusive em plantações em pequena escala onde pode ocorrer restrição para o abate de árvores.

Diante a pouca disponibilidade de informações sobre o perfil do fuste de eucalipto em sistemas agroflorestais, este estudo objetivou estimar o afilamento do fuste em cinco sistemas agrossilvipastoris na região da Zona da Mata mineira, comparando modelos de regressão e redes neurais artificiais, e determinar a viabilidade de multiprodutos da madeira.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Caracterização da região de estudo**

A mesorregião da Zona da Mata possui clima com influência das variações altimétricas. De acordo com Golfari (1975), a região possui, em média, temperaturas de 18°C, precipitações em torno de 1.500 mm, com pelo menos 3 ou 4 meses de estiagem por ano. A topografia apresenta relevo do montanhoso ao ondulado, com predomínio de latossolos profundos e drenados, com acidez elevada e baixa fertilidade natural (CURI et al. 1992).

A Zona da Mata mineira é formada por 142 municípios que estão agrupados em sete microrregiões: Juiz de Fora, Cataguases, Muriaé, Ubá, Manhuaçu, Ponte Nova e Viçosa (IBGE, 2015). A microrregião de Viçosa é composta por vinte municípios dentre eles as cidades de Viçosa, Cajuri e Coimbra. A microrregião de Ubá, é formada por dezessete municípios, a exemplo tem-se a cidade de Visconde do Rio Branco (IBGE, 2015).

O município de Viçosa está localizado a 20° 46' de latitude sul e 42° 51' de longitude oeste. De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo Cwb, mesotérmico com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos. A cidade ocupa área de 299,397 km<sup>2</sup> e possui altitudes que oscilam de 600 a 970 m. Nessa região predominam os latossolos vermelho-amarelo distróficos, a topografia é constituída pelo domínio dos mares de morros (RADAMBRASIL, 1983; CORREA, 1984). A cidade de Cajuri tem como coordenadas geográficas 20° 47' de latitude sul e 42° 47' de longitude oeste. O clima é do tipo Cwa segundo a classificação Köppen, a precipitação média anual gira em torno de 1253 mm, onde os verões são chuvosos e os invernos secos. A temperatura média anual é de 20 °C (RIBEIRO et al. 2014; IBGE, 2015). Já Coimbra está situada nas coordenadas geográficas de 20° 50' na latitude sul e 42° 48' de longitude oeste. O clima de acordo com Köppen é do tipo Cwa com altitude de 715 m. A precipitação média anual é de 1350 mm, as chuvas se concentram nos meses de outubro a março com um período de estiagem bem definido. Os solos da região são classificados como argissolos vermelho-amarelo (SANTOS et al. 2006).

O município de Visconde do Rio Branco está localizado a 21°00' de latitude sul e 42°50' de longitude oeste. O clima é classificado segundo Köppen como Cwa com altitude media em torno de 350 m. A precipitação média anual gira em torno de 1100 mm, com chuvas concentradas no período de outubro a março. Os solos do município são classificados como latossolos vermelho-amarelo distróficos e álicos (SILVA et al. 2009; PORTUGAL et al. 2010).

## **2.2. Dados**

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos em sistemas agrossilvipastoris constituídos de milho (*Zea mays*), que foi cultivado apenas no primeiro ano de implantação dos sistemas, braquiária (*Brachiaria spp.*) e eucalipto (*Eucalyptus spp.*). Esses sistemas foram implantados em quatro municípios próximos a região de Viçosa, Minas Gerais, situada na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, conforme descrição na Tabela 1.

Tabela 1. Informações sobre os sistemas agrossilvipastoris e caracterização das suas localidades estudadas

Localidade	Altitude (m)	Temperatura Média (°C)	Precipitação Média (mm)	Área (ha)	Ano Implantação	Genótipo Eucalipto	Arranjo espacial (m)
Viçosa – UFV (Correa, 1984)	600 a 970	14,6 a 21,8	1.221	0,6	2007	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100)	12 x 2 e 12 x 4 *
Viçosa – Deserto (Correa, 1984)	600 a 970	14,6 a 21,8	1.221	0,9	2007	Eucalyptus grandis x E. urophylla (3336)	8 x 3
Coimbra (Santos et al. 2006)	740	19,0	1.300 a 1.400	3,5	2009	Eucalyptus grandis x E. urophylla (a confirmar)	12 x 3
Visconde do Rio Branco (Silva et al. 2009)	345	24,0	1.100	6.0	2010	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100 e I144) e Eucalyptus grandis (CRV1189)	10 x 3
Cajuri (Ribeiro et al. 2014)	720	18,0 a 23,0	1.221	2,0	2009	Eucalyptus grandis x E. urophylla (GG100)	11 x 3

\*O sistema agrossilvipastoril localizado da localidade Viçosa – UFV, inicialmente, era composto por eucalipto e eucalipto + acácia (intercaladas na linha de plantio), em arranjo espacial de 12 x 2 m. Aos 4 anos de idade, realizou-se desbaste da acácia, proporcionando os arranjos espaciais 12 x 2 m e 12 x 4 m.

### 2.3. Coleta de dados

A coleta dos dados procedeu-se por meio de inventários florestais através de censo 100% nas localidades Viçosa-UFV e Viçosa-Deserto, e de amostragem em parcelas nas demais localidades. Nas localidades com amostragem, foram instaladas três parcelas contendo um número de 24 plantas cada. Em cada parcela foram coletados os diâmetros de todas as árvores e a altura das oito primeiras .

Foram cubadas de 122 árvores utilizando-se duas metodologias. Para as localidades Viçosa-UFV e Viçosa Deserto, onde não havia restrição para o abate das árvores, foi empregada a cubagem convencional. Nas demais localidades, onde ocorria tal restrição, foram realizadas cubagens em pé, utilizando o aparelho pentaprisma de Weeler.

Para a obtenção dos valores de diâmetros ao longo do fuste utilizaram-se três árvores-amostra por classe de diâmetro, com amplitude de 2 cm. Foram medidos (com suta ou pentaprisma) os diâmetros nas alturas de 0,10 m, 0,30 m, 0,70 m, 1,0 m e 1,30 m. A partir dessa última altura, os diâmetros foram mensurados até a altura onde o diâmetro fosse igual a 7,0 cm (diâmetro comercial), sendo, os diâmetros de cada seção medidos a cada 1,0 m.

O volume individual com casca de cada árvore foi calculado pela fórmula de Smalian, sendo obtido pela soma dos volumes individuais das seções:

$$V = (AS_1 + AS_2)/2 \times L \quad (1)$$

Em que:

V = Volume sem casca da seção, em m<sup>3</sup>;

AS<sub>1</sub> = Área seccional do início da seção, em m<sup>2</sup>;

AS<sub>2</sub> = Área seccional do final da seção, em m<sup>2</sup>;

L = Comprimento da seção, em m.

## 2.4. Regressão

De posse dos dados da cubagem, esses foram utilizados para o ajuste dos modelos de afilamento do fuste propostos por Garay (1979) (2), Kozak et al. (1969)(3), Demaerschalk (1972) (4) e Ormerod (1973) (5). O software utilizado foi o Statistica 13.0 (STATSOFT, INC, 2016) e os modelos ajustados foram:

$$d = dap\beta_0(1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} Ht^{-\beta_3})) + \varepsilon \quad (2)$$

$$d = dap\sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right)^2} + \varepsilon \quad (3)$$

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

$$d = \beta_0 \left(\frac{Ht-h}{Ht-1,3}\right)^{\beta_1} + \varepsilon \quad (5)$$

em que:

d= diâmetro sem casca, em cm, na altura h;

dap = diâmetro com casca na altura 1,30 m, em cm;

h = distância do nível do terreno até o diâmetro d, em m;

Ht = altura total da árvore, em m;

$\beta_i$  = parâmetros do modelo;

$\varepsilon$  = erro aleatório;

As estimativas de afilamento do fuste geradas pelos modelos foram avaliadas com base nas estatísticas da raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM) (6), correlação entre os dados observados e estimados ( $r_{y\hat{y}}$ ) (7), e a média dos desvios absolutos (MDA) (8). Ainda, foram analisados gráficos de dispersão dos erros relativos percentuais e histograma de frequência dos erros percentuais (ER%) (9).

$$RQEQM \% = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$r_{y\hat{y}} = \frac{cov(Y_i - \hat{Y}_i)}{\sqrt{var(Y_i)var(\hat{Y}_i)}} \quad (7)$$

$$MDA = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (8)$$

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

em que:

$\bar{Y}$  = é a média dos valores observados;

n = é o número total de dados observados;

$\hat{Y}_i$  = valor do i-ésimo diâmetro estimado;

$Y_i$  = valor do i-ésimo diâmetro observado;

cov = covariância;

var = variância

Foi aplicado o teste de identidade (GRAYBILL, 1976), para testar a necessidade de se ajustar modelos específicos para cada condição específica (área, idade, espaçamento, clone), onde a hipótese de nulidade foi:  $H_0$ : não existe diferença significativa entre um modelo geral e modelos específicos.

## 2.5. Redes Neurais Artificiais

Utilizando o mesmo grupo de dados de árvores cubadas, foram treinadas redes neurais artificiais para a obtenção das estimativas de afilamento do fuste para tal, 70% dos dados foram utilizados para treinamento das RNA, e 30% para validação. A escolha dessas percentagens de treinamento e validação foram feitas aleatoriamente, através do software Neuroforest ® 4.0 ([www.neuroforest.ucoz.com](http://www.neuroforest.ucoz.com)).

O tipo de rede treinada foi Multilayer Perceptron (MLP) com emprego dos algoritmos treinamento Resilient Propagation e Skyp Layer, com 8 neurônios na camada intermediária. Como variáveis contínuas de entrada utilizou-se a idade (anos), dap a 1,3 m de altura (cm), altura total Ht (m), os diâmetros ao longo do fuste d (cm) e suas respectivas posições h (m), enquanto as variáveis categóricas foram o espaçamento, localidade e os genótipos. As variáveis numéricas foram normalizadas no intervalo de 0 a 1. Como critério de parada foi utilizado o número de ciclos (3.000) e a minimização do erro quadrático médio (0,0001).

Para avaliação e seleção das melhores RNA foram utilizadas as mesmas estatísticas adotadas para o método da regressão.

## 2.6. Sortimento de Madeira

Após o ajuste das equações de afilamento e da equação hipsométrica, realizou-se uma simulação do sortimento da madeira no sistema agrossilvipastoril da localidade Viçosa-UFV, para o arranjo espacial 12 x 4 m. Posteriormente, foi realizada a distribuição das classes de diâmetro com as respectivas alturas médias e número de árvores por hectare, para cada arranjo espacial (Tabela 2).

Tabela 2. Distribuição das classes de diâmetro, altura média e número de árvores por hectare de cada arranjo espacial no sistema agrossilvipastoril da localidade Viçosa-UFV, aos oito anos de idade.

Arranjo espacial (m)	Classe de diâmetro (cm)	Altura total média (m)	Número de árvores por hectare
12 x 4	26	29,86	11
	28	31,22	26
	30	32,20	37
	32	32,09	46
	34	34,66	29
	36	34,02	31
	38	34,65	14
	40	34,68	9
	42	35,90	6

Foram avaliados quatro diferentes usos da madeira de acordo com o mercado da região e seguindo suas prioridades em função do preço da madeira. Este sortimento foi comparado com o uso de todas as árvores para lenha, cuja destinação tem sido mais frequente nos plantios em pequena escala. As especificações de diâmetro mínimo, máximo e comprimento de tora são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Classes de sortimento em função dos custos, diâmetros mínimos, máximos, e comprimento de toras de eucalipto do sistema agrossilvipastoril da localidade Viçosa-UFV, aos oito anos de idade

Usos	Prioridade	Preço da madeira (R\$ m <sup>-3</sup> )	Diâmetro mínimo (cm)	Diâmetro máximo (cm)	Comprimento de tora (m)
Serraria	1	170,00	25	200	300
Lenha	2	30,00	8	50	200
Mourão -1	3	2,00*	12	15	220
Mourão -2	4	1,00*	8	12	220

\* preço por unidade.

Para geração das estimativas de diâmetro (10) e altura (11) ao longo do fuste empregou-se o modelo proposto por Demaerschalk (1972), uma vez que este proporcionou as melhores estimativas tanto de diâmetro quanto de altura ao longo do fuste:

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

$$h = Ht - \left[ \frac{d}{10^{\beta_0} dap^{\beta_1} H^{\beta_2}} \right]^{\left( \frac{1}{\beta_3} \right)} \quad (11)$$

A simulação do sortimento da madeira foi realizada utilizando-se o software gratuito SigmaE ([hgleite@gmail.com](mailto:hgleite@gmail.com)), baseado num modelo matemático de programação dinâmica que visa otimizar e determinar possíveis usos da madeira. Este software pode ser conseguido com a autora do presente estudo através do seguinte email [simone.silva.ufv@gmail.com](mailto:simone.silva.ufv@gmail.com).

Para realização do sortimento via SigmaE, é necessário entrar com os seguintes inputs no software: distribuição das classes de diâmetro seguida da altura total média de cada classe e número de árvore por hectare; os diferentes usos da madeira que se deseja determinar. Esses usos devem ser preenchidos em função do preço da madeira, uma vez que a prioridade dos mesmos será dada ao de maior valor de mercado. Cada produto ou uso da madeira deve estar associado a um comprimento de tora (m), diâmetro mínimo e máximo (cm). Por fim, após o ajuste das equações de afilamento é necessário selecionar a equação que apresenta as melhores estimativas de diâmetro e altura. A seleção da melhor equação será feita com base nas estatísticas da RQEM,  $r_{yy}$  e MDA, também foram empregados gráficos de dispersão dos erros relativos percentuais e histograma de

frequência dos erros percentuais relativo. As equações selecionadas também servirão de input.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Regressão**

A princípio foram avaliados e selecionados modelos de afilamento do fuste específicos para cada localidade estudada.

##### **3.1.1. Viçosa - UFV**

De acordo com o teste de identidade proposto por Graybill (1976) verificou-se que para a localidade Viçosa - UFV, os arranjos espaciais de plantio (12 x 2 m e 12 x 4 m) influenciavam ( $p < 0,05$ ) no afilamento do fuste das árvores.

Assim, ajustaram-se modelos de taper específicos para cada arranjo espacial, ao se avaliar os quatro modelos de afilamentos testados observou-se que o modelo proposto por Garay (1979) foi o mais indicado para esta localidade, devendo ser ajustado para ambos os arranjos espaciais.

Nos histogramas de frequência dos erros (Figura1) observa-se que, aproximadamente, 89% das frequências de erro concentraram-se nas classes de  $\pm 10\%$ . Foi possível verificar através dos gráficos de dispersão residual pequenas tendências superestimativas e subestimativas nos menores diâmetros do fuste das árvores nos arranjos 12 x 2 m e 12 x 4 m, respectivamente.

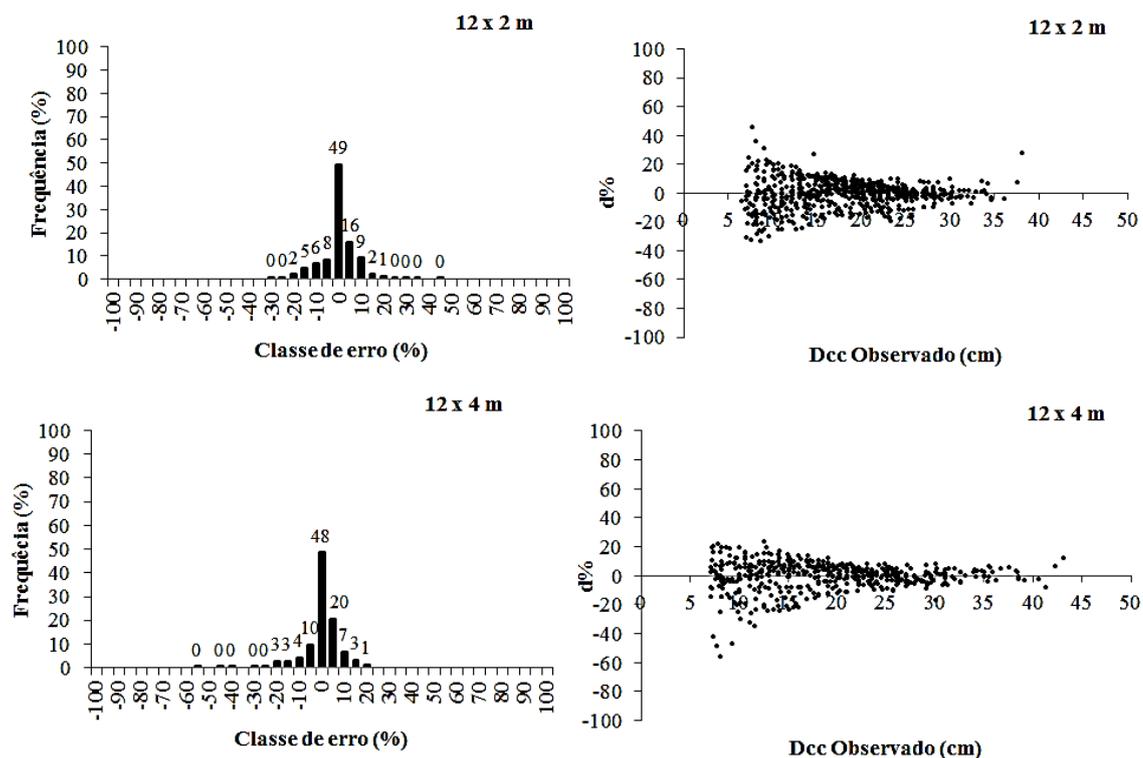


Figura 1. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais em função do dap referentes ao ajuste dos modelos de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Viçosa - UFV, nos arranjos espaciais 12 x 2 m e 12 x 4 m, aos oito anos de idade.

A Tabela 4 apresenta as estatísticas de avaliação dos modelos, onde podem ser observados valores médios de RQEQM,  $r_{y\hat{y}}$  e DMA de 7,65 %, 0,9598 e 1,12, respectivamente. Estes valores indicam boa precisão das estimativas geradas pelo modelo proposto por Garay ajustado, por arranjo espacial de plantio.

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste dos modelos específicos de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Viçosa - UFV, nos arranjos espaciais 12 x 2 m e 12 x 4 m, aos oito anos de idade

Modelos	Parâmetros				RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$			
Garay (1979) - 12x2 m	1,1837*	1,2868*	0,3412*	0,3037*	7,98	0,9508	1,12
Garay (1979) - 12x4 m	1,1391*	0,6211*	0,7545*	0,4329*	7,32	0,9688	1,11

(p < 0,05)\*; (p > 0,05)<sup>ns</sup>.

### 3.1.2. Viçosa - Deserto

Para a localidade Viçosa - Deserto, não houve necessidade de teste de identidade de modelos, pois no plantio não havia variações de arranjo espacial e genótipo, sendo ajustado o modelo único de afilamento para a localidade.

O modelo proposto por Garay (1979) foi o mais adequado para local, apresentando grande parte da dispersão residual concentrada entre  $\pm 20\%$ . Com relação ao histograma, observou-se frequência de 85% dos erros nas classes de  $\pm 10\%$ , sendo evidenciada tendência à normalidade.

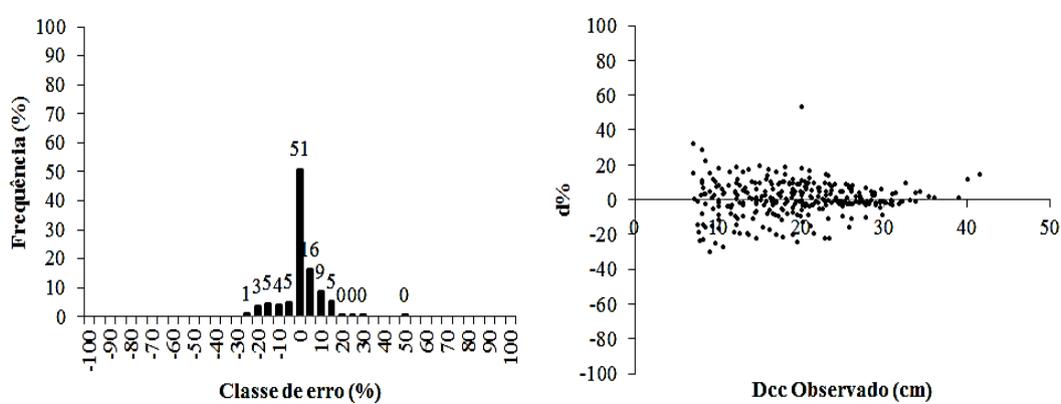


Figura 2. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste do modelo de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Viçosa - Deserto, no arranjo espacial 8 x 3 m, aos oito anos de idade.

De acordo com a Tabela 5, observa-se que o modelo se ajustou bem aos dados observados, apresentando valores baixos de DMA (0,96) e RQEQM (10,19%), conferindo boa acurácia nas estimativas.

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste dos modelos específicos de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Viçosa - Deserto, no arranjo espacial 8 x 3 m, aos oito anos de idade

Modelos	Parâmetros				RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$			
Garay (1979)	1,1928*	0,3759*	1,1874*	0,3933*	10,19	0,9626	1,26

( $p < 0,05$ )\*; ( $p > 0,05$ )<sup>ns</sup>.

### 3.1.3. Visconde do Rio Branco

Para os SASP na localidade de Visconde do Rio Branco, onde existiam três genótipos no arranjo espacial 10 x 3 m, não foi evidenciada diferença significativa ( $p > 0,05$ ) pelo teste F de Graybill (1976) entre o ajuste de modelos gerais e específicos por genótipo, ou seja, a forma do fuste não foi afetada pelo genótipo. Portanto, ajustou-se o modelo geral único de afilamento do fuste para os genótipos.

O modelo geral recomendado para o local foi o proposto por Garay (1979), cujo gráfico de dispersão residual e histograma são apresentados na Figura 3. Com relação ao histograma, os dados indicam que o modelo apresentou uma tendência à normalidade na distribuição dos erros, com frequência de 84% destes concentrados nas classes de  $\pm 10\%$ . Pelos gráficos de dispersão residual, é possível observar uma leve tendência de subestimativa nos diâmetros de 5 a 10 cm.

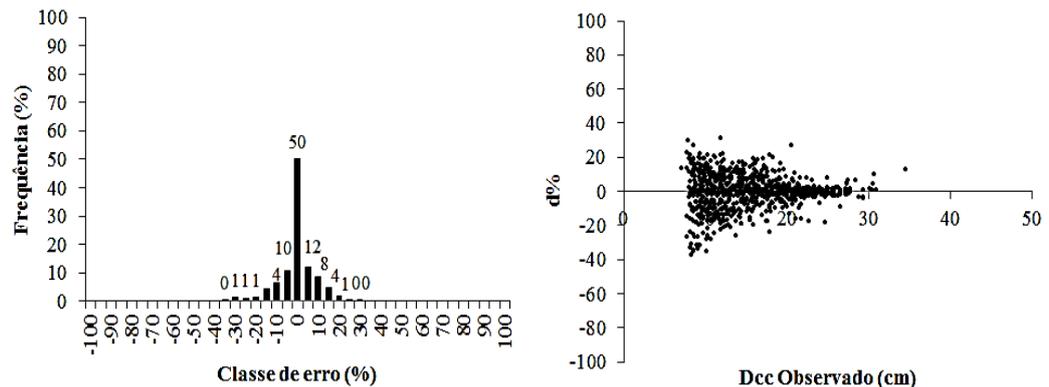


Figura 3. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste do modelo geral de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Visconde do Rio Branco, no arranjo espacial 10 x 3 m, aos cinco anos e meio de idade.

As estatísticas de avaliação do modelo selecionado apresentaram excelente desempenho (Tabela 6), com valores de RQEQM e DMA bem próximos a zero e a  $r_{y\hat{y}}$  próxima a 1.



valores de  $r_{y\hat{y}}$  de 0,8941, o que indica que quanto mais próximo de 1 a correlação estiver, maior é o grau de associação entre os valores observados e estimados de diâmetro ao longo do fuste.

Tabela 7. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste do modelo de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Cajuri, no arranjo espacial 11 x 3 m, aos seis anos e meio de idade

Modelo	Parâmetros				RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$			
Garay (1979)	1,2404*	6,1051 <sup>ns</sup>	0,1350 <sup>ns</sup>	0,4654*	17,26	0,8941	1,55

( $p < 0,05$ )\*; ( $p > 0,05$ )<sup>ns</sup>.

### 3.1.5. Coimbra

O modelo mais adequado para o sistema foi o proposto por Garay (1979), cujos gráfico de dispersão de resíduos e histograma são apresentados na Figura 5.

Pelo gráfico de dispersão residual notam-se ligeiras tendências subestimativas e superestimativas nos diâmetros de 8 cm a 10 cm. Entretanto, o modelo mostrou-se eficiente para predição do diâmetro das árvores, uma vez que concentrou 78% dos erros nas classes de  $\pm 10\%$ .

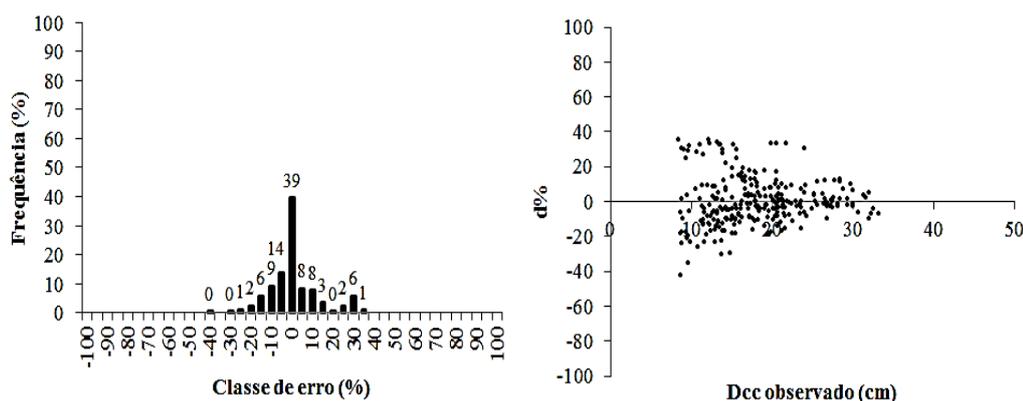


Figura 5. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste do modelo de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Coimbra, no arranjo espacial 12 x 3 m, aos seis anos e meio de idade.

Ao analisar as estatísticas de avaliação do modelo selecionado (Tabela 8), observa-se boas estimativas para o local, com valor de RQEQM de 11,48 %. O restante das estatísticas está de acordo com os padrões aceitáveis na literatura.

Tabela 8. Estatísticas referentes ao ajuste do modelo de afilamento do fuste de eucalipto em sistema agrossilvipastoril na localidade Coimbra, no arranjo espacial 12 x 3 m, aos 6,5 anos de idade

Modelo	Parâmetros				RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$			
Garay (1979)	1,2760*	8,8015 <sup>ns</sup>	0,0910 <sup>ns</sup>	0,4032*	11,48	0,9406	1,59

(p < 0,05)\*; (p > 0,05)\*\*.

### 3.1.6. Modelo Geral

Realizou-se o teste de identidade F de Graybill testando a hipótese de que não existe diferença significativa (p > 0,05) entre o ajuste de equações específicas, por localidade, e uma equação geral para todos os locais estudados. Assim, verificou-se que o emprego de um modelo geral pode ser ajustado sem perdas de precisão. Diante disso, constatou-se que o modelo geral proposto por Garay (1979) apresentou o melhor desempenho, sendo recomendado para geração de estimativas de afilamento do fuste para os sistemas agrossilvipastoris estudados nas diferentes localidades.

Ao analisar o gráfico de dispersão residual é possível observar uma tendenciosidade a subestimar os diâmetros de 7 a 15 cm (Figura 6). No entanto, o histograma indica distribuição normal dos erros, ou seja, maiores frequências dos erros estão concentradas nas menores classes.

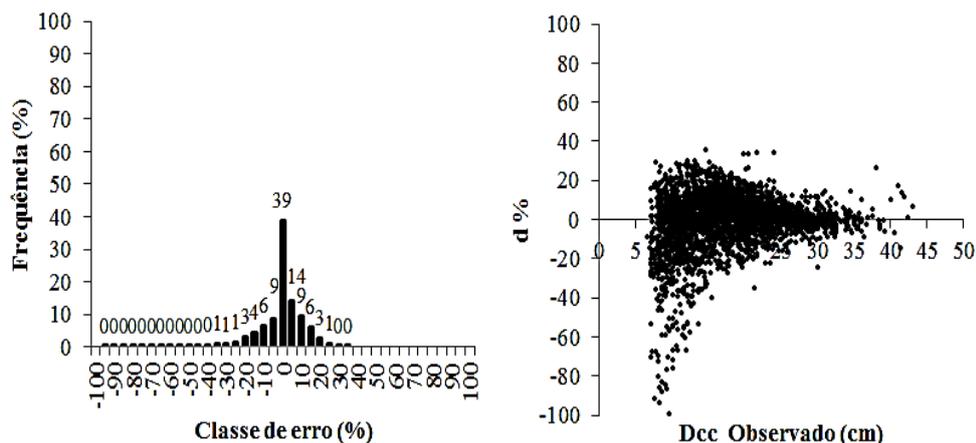


Figura 6. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes ao ajuste do modelo geral de afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas.

A Tabela 9 apresenta os valores das estatísticas de ajuste do modelo geral selecionado, indicando boa precisão em suas estimativas. Foi verificado que, em alguns casos, os resultados estatísticos apresentados pelo modelo geral foram superiores aos valores obtidos pelos modelos específicos ajustados separadamente para cada localidade estudada.

Tabela 9. Estimativas dos parâmetros e estatísticas referentes ao ajuste do modelo geral de afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas

Modelo Geral	Parâmetros				RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$			
Garay (1979)	1,2080*	3,5616*	0,2007*	0,4642*	11,61	0,9521	1,54

( $p < 0,05$ )\*; ( $p > 0,05$ )<sup>ns</sup>.

### 3.2.Redes Neurais Artificiais

Para o emprego da metodologia de redes neurais artificiais não houve necessidade de estratificação, diante da possibilidade de indentificar e explicar a variação existente nos dados sem perdas de exatidão. Após o treinamento de várias RNA para

estimação do afilamento do fuste por meio dos algoritmos de treinamento Resilient Propagation e Skyp Layer, selecionou-se a melhor rede. Na Figura 7, ao analisar os gráficos de dispersão residual, observa-se similaridade nos resultados dos dois algoritmos testados, com ambos apresentando aproximadamente, 94% da frequência dos erros na classe de  $\pm 10\%$ . De acordo com os histogramas, verifica-se que ambos os algoritmos apresentam leves tendências subestimativas dos menores diâmetros.

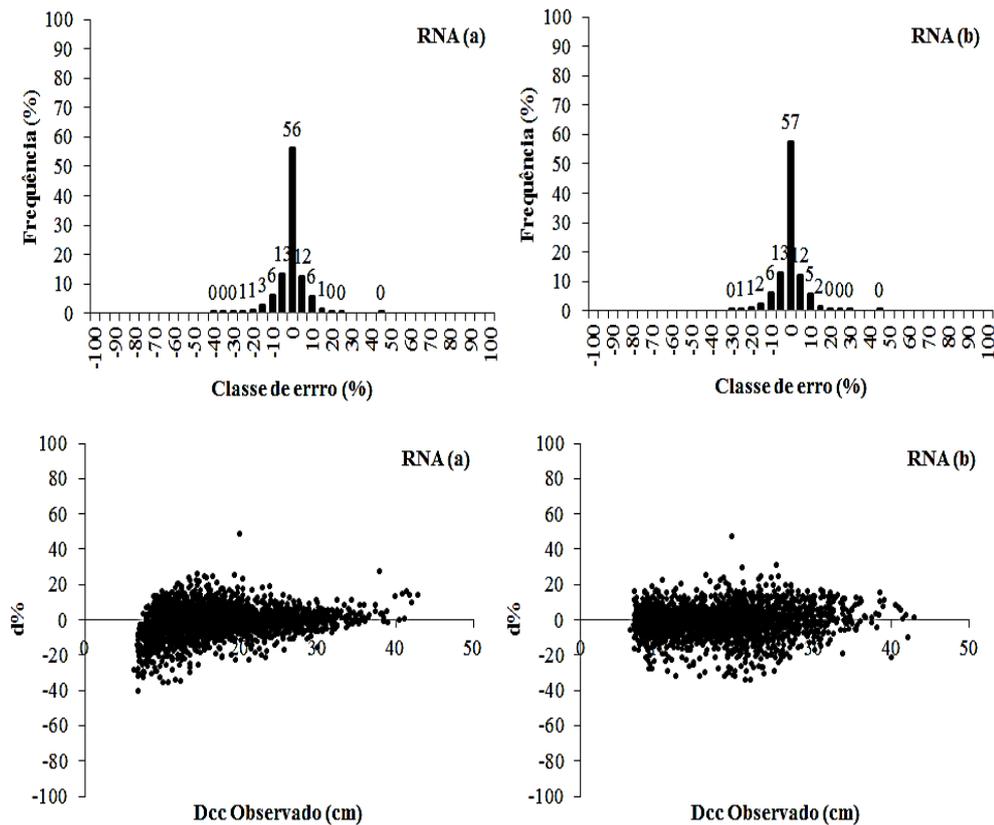


Figura 7. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes as estimativas de afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas, geradas pelas RNA utilizando o algoritmo Resilient propagation (a) e Skyp Layer(b).

Entretanto, quando se avaliou os resultados estatísticos (Tabela 11), foi possível perceber que apesar da semelhança citada, o algoritmo Skyp Layer apresentou resultados superiores para o valores de validação.

Isso indica que a rede treinada por meio deste algoritmo apresentou uma capacidade de generalização superior, ou seja, a rede consegue aplicar o conhecimento adquirido no momento do treinamento a dados que não fizeram parte deste. Portanto, para a geração de estimativas de afilamento do fuste em sistemas agrossilvipastoris nas

localidades estudadas, recomenda-se o treinamento de RNA utilizando o algoritmo Skyp Layer.

Tabela 10. Estatísticas referentes às estimativas do afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas geradas pelas RNA utilizando os algoritmo Resilient Propagation e Skyp Layer.

Estimativa	Algoritmo	RQEQM (%)	$r_{y\hat{y}}$	DMA
Regressão Garay	<i>Resilient Propagation</i>	6,99	0,9827	0,93
Regressão Garay	<i>Skyp Layer</i>	7,22	0,9815	0,91
Treino	<i>Resilient Propagation</i>	7,05	0,9820	0,92
Treino	<i>Skyp Layer</i>	6,82	0,9834	0,88
Validação	<i>Resilient Propagation</i>	5,98	0,9840	0,04
Validação	<i>Skyp Layer</i>	2,99	0,9769	0,02

Quando se comparou o desempenho estatístico das estimativas de afilamento do fuste obtidas pelo modelo geral com os gerados pelas RNA, verificou-se que ambos apresentaram valores de RQEQM e DMA baixos. Isso implica em uma boa acurácia dos métodos, uma vez que, para esta essas estatísticas, quanto mais próximas de zero, melhor é a precisão do ajuste. Entretanto, apesar do bom desempenho do modelo genérico, os resultados gerados pelas RNA, em especial utilizando o algoritmo Skyp Layer, foram ligeiramente superiores, conferindo maior precisão.

As Figuras 8 e 9 contém os histogramas e gráficos de dispersão residual para cada localidade estudada, resultantes das estimativas do afilamento do fuste geradas pelo ajuste do modelo geral, e do treinamento da RNA empregando o algoritmo *Skyp Layer*.

Ao se comparar o desempenho dos histogramas e dos gráficos de dispersão residual, por localidade, obtidos com as metodologias avaliadas, verifica-se que, apesar do desempenho satisfatório observado em ambos os métodos, a rede treinada foi superior. A RNA apresentou maior frequência dos erros concentrada nas menores classes, seguido de uma distribuição residual mais homogênea e próxima ao eixo zero. Entretanto, os dois métodos resultaram em tendências subestimando os menores diâmetros, sendo esta mais acentuada na regressão.

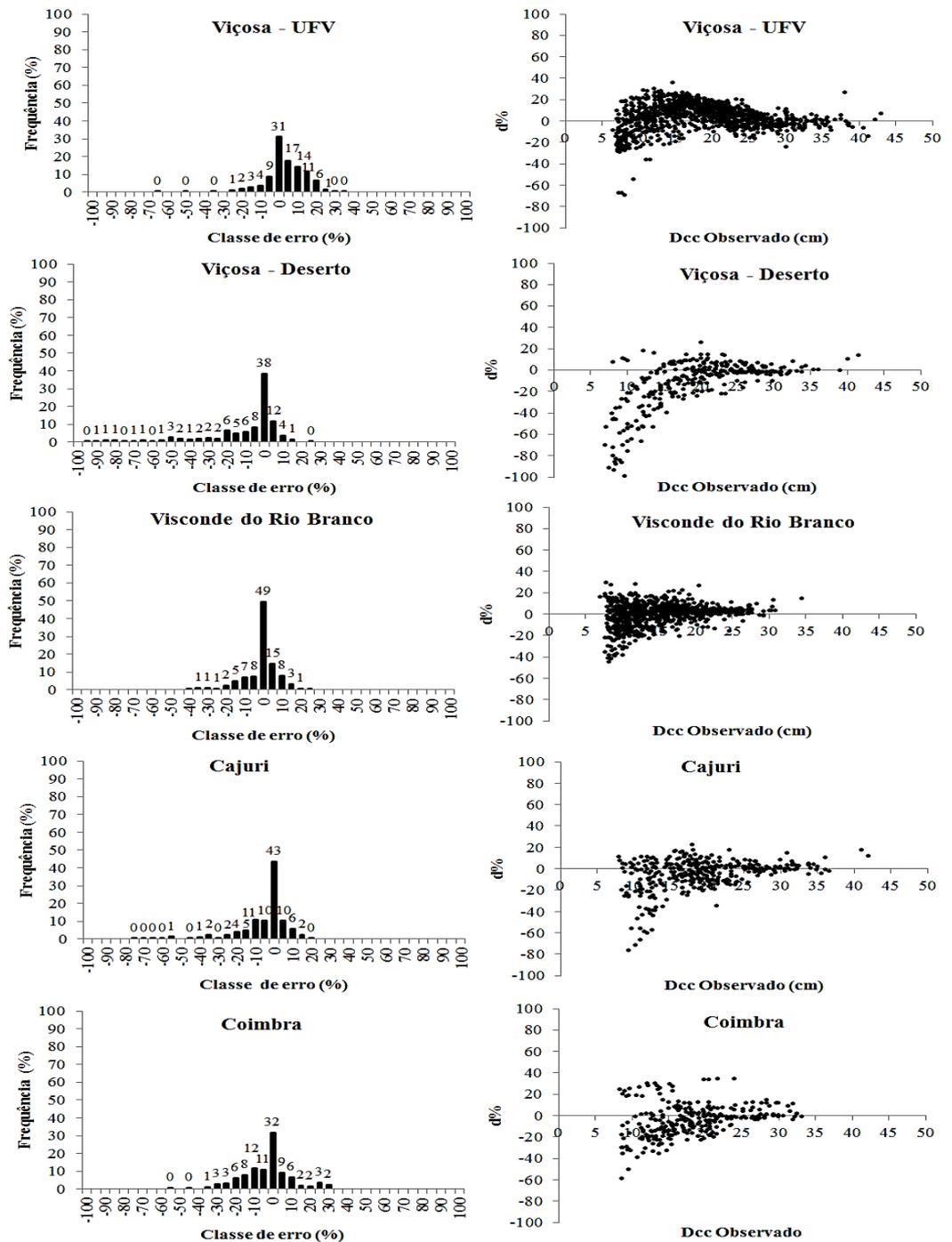


Figura 8. Distribuições de freqüência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes às estimativas de afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas geradas pelo modelo geral de Garay.

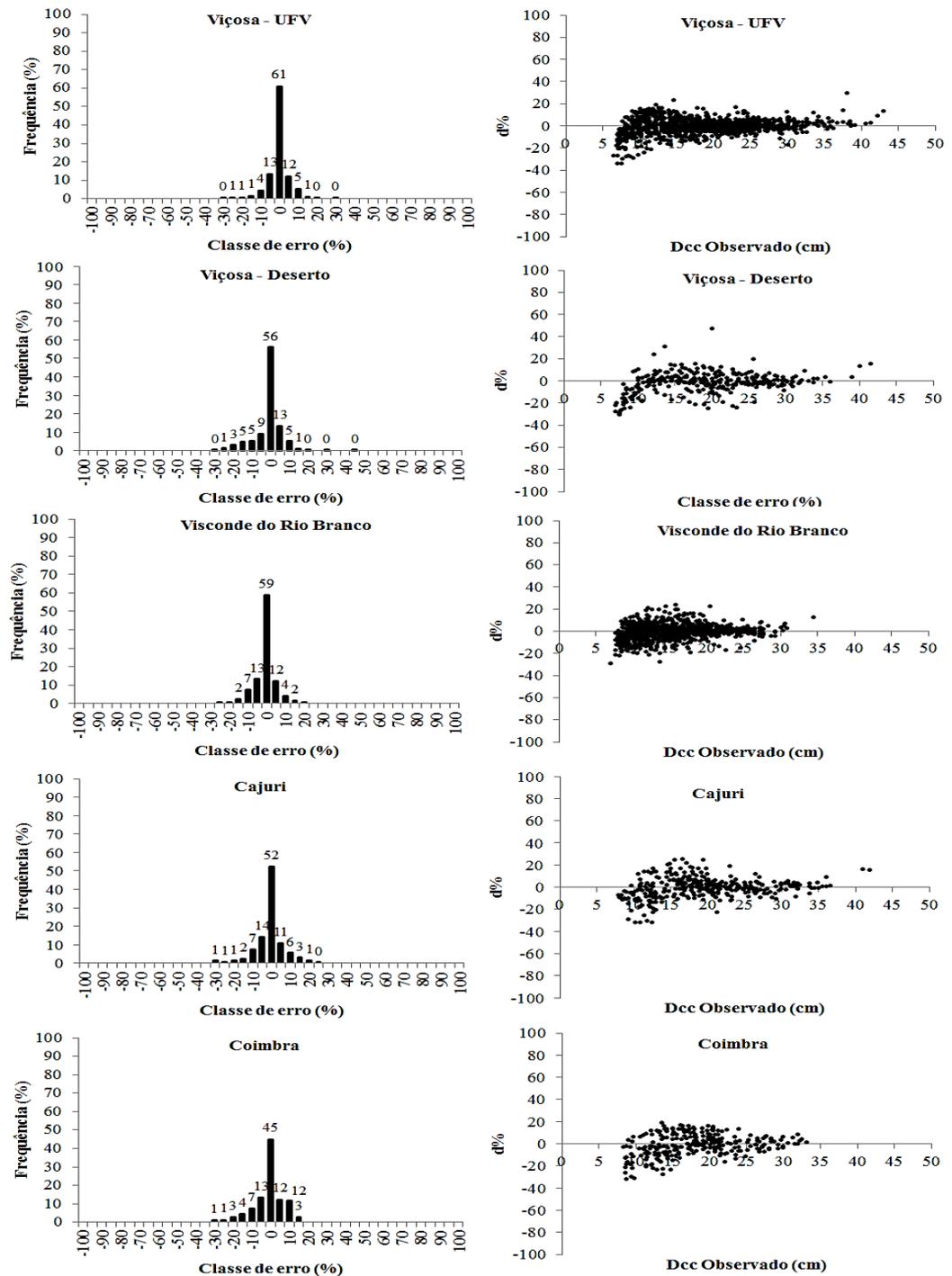


Figura 9. Distribuições de frequência por classe de erro relativo percentual e dispersão dos erros relativos percentuais, em função do dap, referentes as estimativas de afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas, geradas pelas RNA utilizando algoritmo *Skyp Layer*.

As Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos de perfil do fuste por localidade, plotados por meio das estimativas geradas pelas RNA e pelo modelo de taper selecionado. Observa-se que, para ambas as metodologias, os diâmetros estimados seguem a mesma tendência dos diâmetros observados. Além do mais, os dois métodos

avaliados conseguiram retratar corretamente o afilamento do fuste do eucalipto nos sistemas agrossilvipastoris da região estudada. As espécies arbóreas nestes sistemas são implantadas em arranjos espaciais mais amplos, portanto, espera-se que tenham fustes mais cônicos.

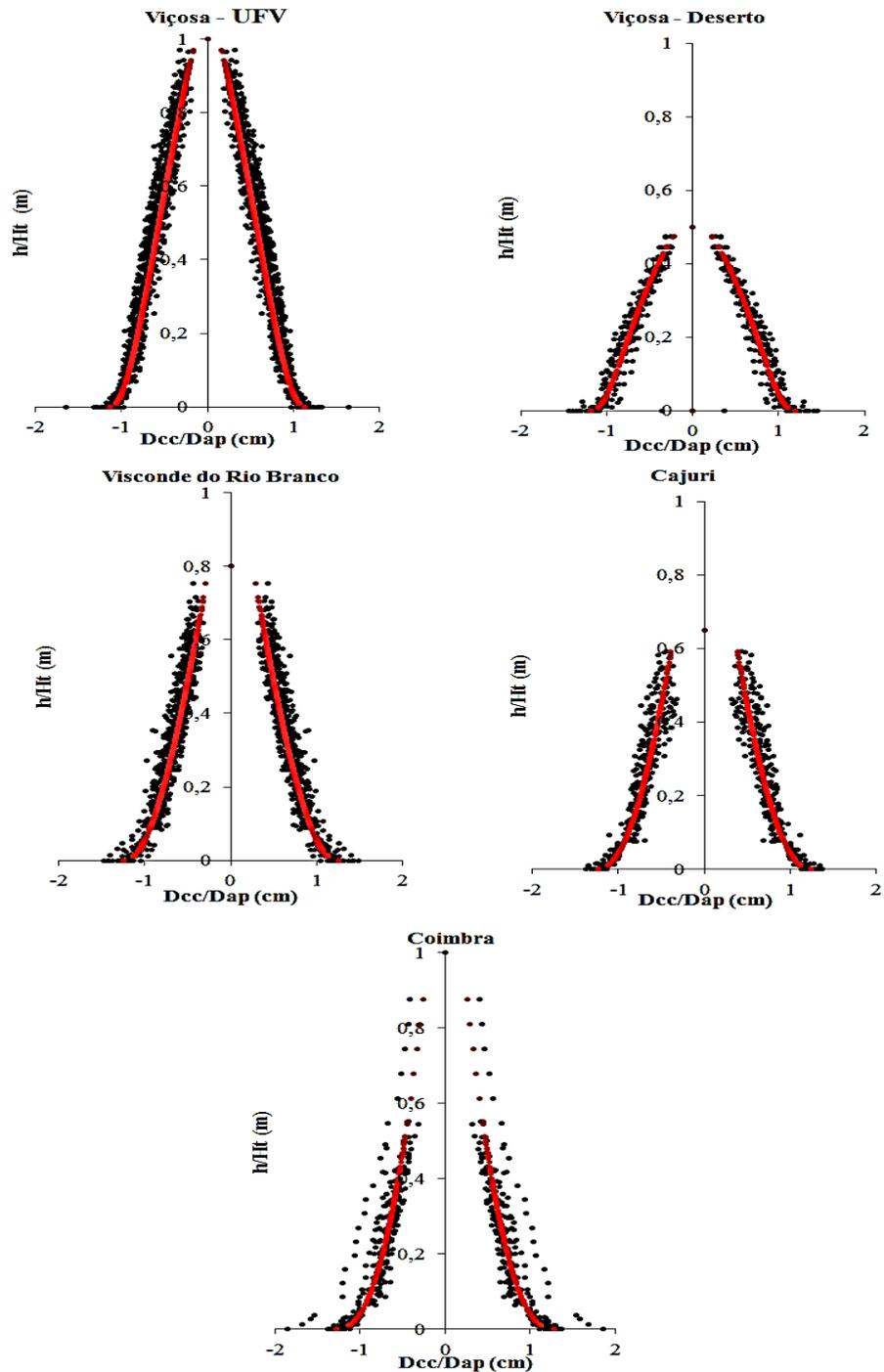


Figura 10. Gráficos do perfil do fuste com dados de  $Dcc/Dap$  observados e estimados pelo modelo geral de Garay, em função de  $h/Ht$ , para eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas (pontos pretos são dados observados e vermelhos estimados).

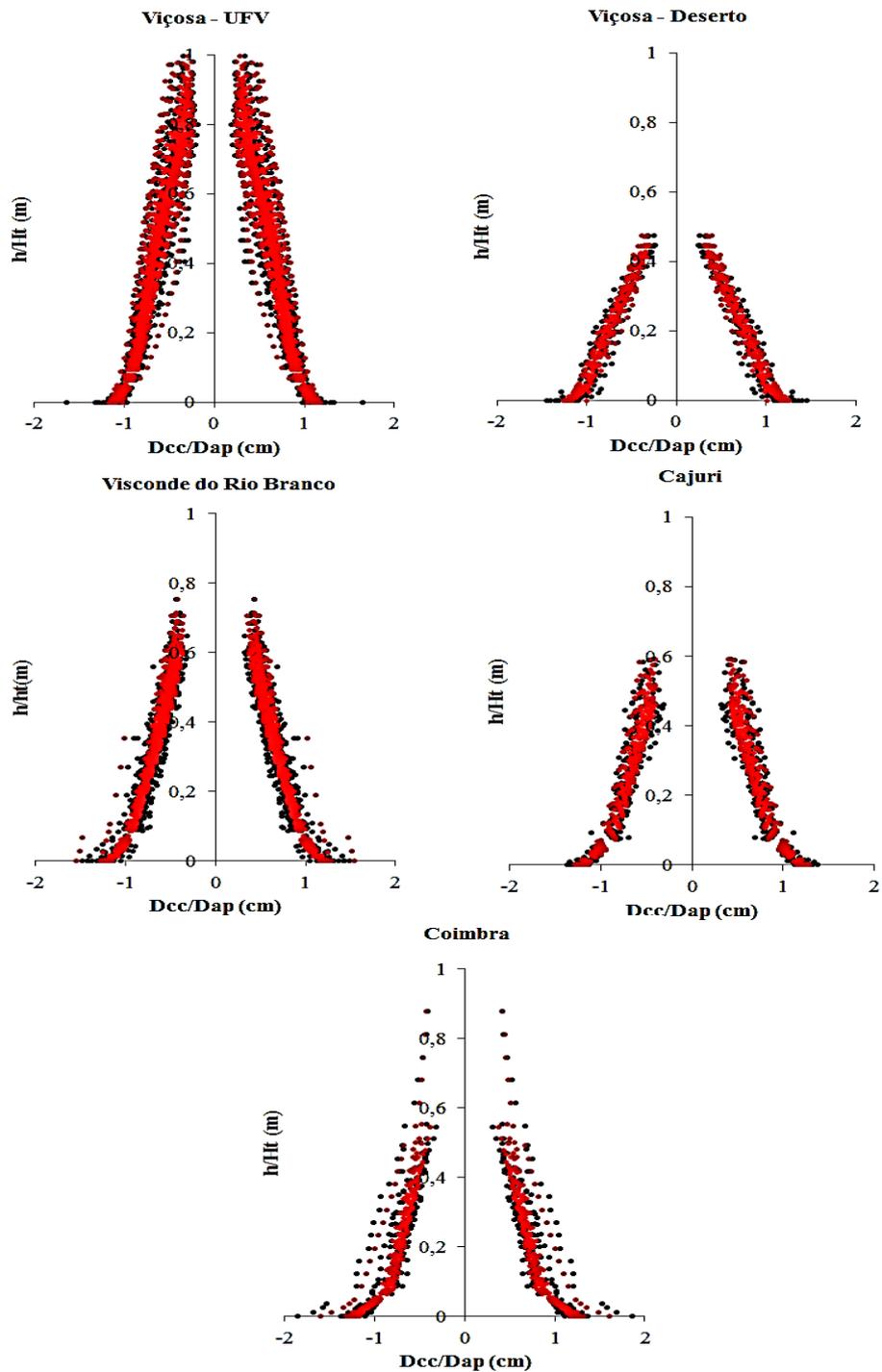


Figura 11. Gráfico de perfil do fuste com dados de Dcc/Dap observados e estimados pela RNA, empregando o algoritmo *Skyp Layer*, em função de  $h/Ht$ , para eucalipto em sistemas agrossilvipastoris nas localidades estudadas (pontos pretos são dados observados e vermelhos estimados).

### 3.3.Sortimento

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os resultados referentes à destinação da madeira do sistema agrossilvipastoril Viçosa-UFV para o uso como lenha e multiprodutos respectivamente. Nestas tabelas são apresentadas as classes de diâmetro, as alturas médias, o número de árvores por hectare, assim como o volume de madeira com casca por classe de diâmetro, e volume de madeira recuperado considerando um rendimento de 100% seguido das suas respectivas receitas brutas.

Tabela 12. Volume e receita bruta de madeira, por classe de diâmetro, resultante do sortimento para lenha realizado no sistema agrossilvipastoril da localidade Viçosa-UFV, no arranjo espacial 12 x 4 m, aos oito anos de idade.

Classes diamétricas (cm)	Hm (m)	N/ha	Volume cc (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume recuperado (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Receitas (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Rend (%)
42	35,90	6	10,82	10,82	315,74	100
40	34,70	9	14,36	14,36	417,45	100
38	34,60	14	20,36	20,36	591,27	100
36	34,0	31	40,39	40,39	1.168,39	100
34	34,70	29	35,23	35,23	1.016,53	100
32	32,10	46	45,61	45,61	1.308,63	100
30	32,20	37	33,18	33,18	947,46	100
28	31,20	26	19,81	19,81	563,18	100
26	29,90	11	6,92	6,92	195,73	100
<b>Total</b>				226,68	6.524,38	

Tabela 13. Volume e receita bruta de madeira, por classe de diâmetro, resultante do sortimento para os quatro usos da madeira realizado no sistema agrossilvipastoril da localidade Viçosa-UFV, no arranjo espacial 12 x 4 m, aos oito anos de idade

Classes diamétricas (cm)	Hm (m)	N/ha	Volume cc (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume recuperado (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Receitas (R\$ ha <sup>-1</sup> )	Rend (%)
42	35,90	6	10,86	10,86	1.476,37	100
40	34,70	9	14,36	14,36	1.776,21	100
38	34,60	14	20,36	20,36	2.535,53	100
36	34,0	31	40,40	40,40	5.067,35	100
34	34,70	29	35,42	35,42	3.759,99	100
32	32,10	46	45,62	45,62	4.044,15	100
30	32,20	37	33,19	33,19	2.937,64	100
28	31,20	26	19,96	19,96	1.249,27	100
26	29,90	11	6,92	6,92	207,86	100
<b>Total</b>				227,09	23.054,37	

De acordo com as tabelas observou-se que o sistema agrossilvipastoril estudado apresentou volume total em torno de 227 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para os dois métodos avaliados. No entanto, quando foi simulado o sortimento para os quatro usos da madeira (serraria, lenha, mourão 1 e mourão 2) verificou-se que as árvores do sistema quando destinadas a multiprodutos podem gerar maior retorno financeiro em relação a um único uso, no caso, a lenha.

As receitas originadas da simulação para multiprodutos foram de 23.054,37 R\$ ha<sup>-1</sup> enquanto o uso para lenha foi de 6.524,38 R\$ ha<sup>-1</sup>. Com relação à simulação para multiprodutos, observou-se também que maior número de toras de madeira estava sendo destinadas para lenha em relação aos outros produtos.

#### 4. DISCUSSÃO

Verificou-se na localidade Viçosa-UFV os arranjos espaciais influenciavam a forma do fuste das árvores, ou seja, houve diferença ( $p < 0,05$ ) entre os ajustes de um modelo geral e modelos específicos por arranjo espacial. Em virtude disso, recomenda-se para esta localidade o ajuste de modelos de afilamento do fuste específicos para cada espaçamento de plantio.

Segundo Souza et al. (2016), um dos fatores que podem afetar a forma do fuste das árvores é o arranjo espacial inicial de plantio. Esses autores observaram isso

aplicando testes de identidade de modelos em equações de taper ajustadas por espaçamento (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), com intuito de se verificar a igualdade entre as formas dos fustes de árvores, em monocultivo, de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*.

Para a localidade Visconde do Rio Branco, onde se avaliou a hipótese de que não existe diferença significativa entre o ajuste de um modelo geral e de um modelo específico por genótipo, verificou-se que os materiais genéticos não influenciavam na forma do fuste das árvores. Assim, ajustou-se um modelo genérico contemplando todos os genótipos.

Esse resultado se diverge do encontrado por Macedo et al. (2006), que observaram variações na forma do fuste em diferentes genótipos de eucalipto em um sistema agrossilvipastoril na região noroeste de Minas Gerais, no arranjo espacial de 10 x 4 m, aos 2 anos de idade.

O ajuste do modelo geral de afilamento proposto Garay para todas as localidades estudadas pode ser efetuado sem perdas de exatidão. Por se tratar de um método menos oneroso, constata-se que o emprego deste modelo se adequa melhor às condições da Zona da Mata, onde predominam pequenas áreas plantadas.

O modelo geral proposto por Garay teve boa representação do fuste das árvores dos sistemas agrossilvipastoris da região, apresentando uma forma mais cônica em relação aos monocultivos florestais. De acordo com Nogueira et al. (2008), plantios implementados em arranjos espaciais mais amplos resultam em árvores com forma do fuste menos cilíndrica.

Campos et al. (2014) estimaram o perfil do fuste de um monocultivo de eucalipto, aos 7 anos de idade, localizado na região da Zona da Mata mineira, e evidenciaram melhor eficiência do modelo proposto por Garay, em relação aos modelos de Kozak, Demaerschalk, Ormerod e Garcia. Entretanto, resultados contraditórios foram encontrados por Müller et al. (2014) que, ao testar vários modelos segmentados e não segmentados para estimar o diâmetro de árvores de eucalipto e acácia, em sistema silvipastoril, no arranjo 3 x 3 + 10 m, aos 10 anos de idade, verificaram melhores resultados para os modelos segmentados de Max & Burkhart e Parresol.

O modelo de Garay é um dos modelos de taper mais difundidos, sendo utilizado em vários estudos (SOUZA, 2009; SILVEIRA et al. 2011; SOUZA et al. 2016), os

quais têm relatado a superioridade das suas estimativas. Para Leite et al. (2006), este modelo possui maior flexibilidade, pois consegue estimar as variações do perfil do fuste de diferentes espécies arbóreas, somando-se ao fato de apresentar maior realismo biológico.

Com relação ao emprego da RNA utilizando os dois algoritmos de treinamento, constatou-se, com base na estatística da RQEQM para validação que, o algoritmo Skyp Layer resultou em maior exatidão, ou seja, este algoritmo teve uma capacidade de generalização superior ao Resilient Propagation. Schikowski et al. (2015) treinaram RNA empregando o algoritmo Resilient Propagation com objetivo de aumentar a exatidão das estimativas do perfil do fuste, em monocultivo de eucalipto, no arranjo espacial 3 x 2 m, e encontraram valor de RQEQM para validação aproximado em 5,30%. No entanto, o algoritmo empregado no presente estudo (*Skyp Layer*), apresentou maior capacidade de generalização, uma vez que resultou numa RQEQM de 2,99%.

O modelo de regressão geral resultou em tendências subestimativas nos menores diâmetros, o que não foi observado nas estimativas geradas pela RNA. Contudo, essa constatação é comumente observada nos modelos de taper, com estudos indicando certa dificuldade em estimar os menores diâmetros ao longo do fuste (SILVA et al. 2011; FAVALESSA et al. 2012; TÉO et al. 2013). Essa inferência não é vista como grande problema, uma vez que à medida que os diâmetros do fuste vão decrescendo o volume individual de cada seção do fuste também tende a ser menor.

Com relação ao desempenho das estatísticas de avaliação, notou-se que os valores obtidos por meio da RNA selecionada foram superiores aos apresentados pela regressão. Leite et al. (2011) compararam o desempenho das estimativas de afilamento do fuste por meio de regressão e RNA, em árvores de *Tectona grandis*, e também observaram maior exatidão com as RNA treinadas.

Silva et al. (2016) visando estimar o diâmetro ao longo do fuste de árvores no sistema agrossilvipastoril do presente estudo, nos arranjos 12 x 2 m e 12 x 4 m, observaram valores estatísticos similares entre o método da regressão e das RNA. Contudo, os autores mencionam que foi necessária uma única rede para explicar a variação existente nos dados contra dois modelos de regressão estratificados por arranjo espacial de plantio.

Outro fator que pode estar associado ao melhor desempenho das redes neurais é a possibilidade de inserção de variáveis categóricas de forma simultânea. A inserção destas variáveis nos modelos de regressão é uma tarefa difícil, uma vez que para executá-la é necessário ter maior conhecimento sobre correlação entre as variáveis. Para contornar essa situação, em muitos casos, realiza-se a estratificação dos dados, um processo que, dependendo da dimensão do banco de dados e da heterogeneidade do povoamento, pode se tornar mais oneroso (CORDEIRO et al. 2015).

Diante disso, as redes neurais artificiais foram eficientes ferramentas para estimar o afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris. Esta metodologia resultou em estimativas mais acuradas, somando-se ao fato da possibilidade de redução dos custos do inventário, pois houve uma redução no banco de dados pelo treinamento de 70% dos dados de inventário. Isso se torna uma alternativa interessante para pequenas áreas plantadas.

Com relação à simulação do sortimento de madeira no sistema agrossilvipastoril da localidade Viçosa-UFV, verificou-se que é mais rentável para o produtor rural destinar as árvores do seu plantio para multiprodutos do que somente para lenha. Tal constatação também foi observada em outros estudos com sistemas agroflorestais, como os de Silveira et al. (2011) e Müller et al. (2011).

Aa simulação realizada considerando multiprodutos da madeira no sistema agrossilvipastoril indicou receita de 23.054,27 R\$ ha<sup>-1</sup>. Esse valor de receita total foi superior aos valores encontrados por Campos et al. (2015), que avaliaram o sortimento de quatro usos da madeira (energia, celulose, escora e serraria) de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, em monocultivo, na Zona da Mata mineira, aos 7 anos de idade, obtiveram em média receitas de 13.314,15 R\$ ha<sup>-1</sup>.

## **5. CONCLUSÕES**

A RNA treinada foi eficiente para estimar o afilamento do fuste de eucalipto em sistemas agrossilvipastoris, apresentando resultados superiores ao modelo de taper selecionado. Apesar disso, a equação obtida com o modelo de Garay também gera estimativas com boa exatidão, podendo ser utilizado em inventários florestais de sistemas agrossilvipastoris na Zona da Mata mineira.

A madeira oriunda do sistema agrossilvipastoril se torna mais rentável quando destinada para multiprodutos, em comparação à destinação exclusiva para lenha.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIGING, G. S. Taper equations for second mixed-conifers of Northean California. **Forest Science**, v.30, n.4, p.1103-1117, 1984.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução do custo em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, n.1, p. 125-129, 2013.

BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B.; CARVALHO, A. P. de L. F. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 262p.

CAMPOS, B. P. F. ; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão dos fustes em multiprodutos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 513-520, 2015.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 548p.

CASTRO, R. V. O. ; CUNHA, A. B.; SILVA, L. V.; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de Eucalyptus utilizando dois métodos para quantificação do índice de local. **Scientia Forestalis**, v.43, n.105, p. 83-90, 2015.

CURI, N.; CARMO, D. N.; BAHIA, V. G.; FERREIRA, M. M.; SANTANA, D. P. Problemas relativos ao uso, manejos e conservação dos solos em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 16, n. 176, p. 5-16, 1992.

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.

DUBÉ, F.; COUTO, L.; GARCIA, R.; ARAÚJO, G. A. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. Avaliação de um sistema agroflorestal com Eucalyptus sp. no estado de em Minas Gerais: o caso da companhia mineira de metais. **Revista Árvore** v.24, n.4, p. 437-443, 2000.

FAVALESSA, C. M. C.; UBIALLI, J. A.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R.; ACOSTA, F. C. Equações de sortimentos para Tectona grandis na região centro – sul de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 389-399, 2012.

FONTAN, I. C. I.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; MONTE, M. A.; RAMOS, D. C.; SOUZA, F. C. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 83, n.2, p. 121 - 131 2011.

FRANCO, F. S.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F.; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J. A. A. Quantificação de erosão em sistemas agroflorestais e convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.26, n.6, p.751-760, 2002.

FREITAS, E.C.S.; OLIVEIRA NETO, S.N.; FONSECA, D.M.; SANTOS, M.V.; LEITE, H.G.; MACHADO, V.D. Deposição de serapilheira e nutrientes no solo em sistemas agrossilvipastoris com eucalipto e acácia. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.409-417, 2013.

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.

GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerias para reflorestamento**. Belo Horizonte: CPFRC, 65p. 1975. (Série Técnica, 3).

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

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; SOARES, C. P. B.; CEOLIN, A. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, v.38, n.2, p.289-295, 2014.

HAYKIN, S. **Redes neurais princípios e aplicações**. 2 ed. Porto Alegre, 2001. 900p.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abhanger Keiten** (Biometrische Beitrage zu aktuellen forschung projekten). Baden: Wurtemberg Mitteilungen der FVA, 1976. (Abt. Biometric und Informatik, 21).

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

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variaveis de povoamento de Pinus taeda L. **Revista rvore** ,v.30, n.4, p.603-612, 2006.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventarios florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista rvore**, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.

LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F. I. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for Tectona grandis Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v.130, n.2, p.263-269, 2011.

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

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

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

LIN, Y.; YANG, H.; IVKOVIC, M.; GAPARE, W. J.; MATHESON, A. C.; WU, H. X. Effect of genotype by spacing interaction on radiata pine genetic parameters for height and diameter growth. **Forest Ecology and Management**, v. 304, p.204 -211, 2013.

MACEDO, R. L. G.; BEZERRA, R. G.; VENTURIN, N.; VALE, R. S.; OLIVEIRA, T. K. Desempenho silvicultural de clones de eucalipto e características agrônômicas de milho cultivados em sistemas silviagrícolas. **Revista Árvore**, v.30, n.5, p.701-709, 2006.

MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARCOVERDE, G. F. B.; HANSEN, M. C. Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, n. 4, p. 265-272, 2009.

MAGALHÃES, J. A.; COSTA, N. L.; PEREIRA, R. G. A.; TOWNSEND, C. R.; BIANCHETTI, A. Sistemas silvipastoris: alternativa para Amazônia. **Revista Bahia Agrícola**, v. 6, n. 3, p. 52-54, 2004.

MARCHI, O. A. M.; CALIJURI, M. L.; COSTA, S. H. G.; LUGÃO, W. G.; SOUZA, P. J. A. Leitura e caracterização da paisagem em auxílio ao planejamento da ocupação urbana de Ponte Nova -MG. **Natureza & Desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 41-50, 2005.

MARTINS, T. P.; RANIERI, V.E.L. Sistemas agroflorestais como alternativa para as reservas legais. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 3, p. 79-96, 2014.

MAX, T. A.; BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, v.22, n.3, p.283-289, 1976.

MENDONÇA, R. A.; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F.; SOUZA, A. L.; TRUGILHO, P. F.; CARVALHO, S. P. C.; POSSATO, E. L. Modelagem da produção de sortimentos em povoamentos de eucalipto. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 587-594, 2014.

MÜLLER, M. D.; SALLES, T. T.; C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; BRIGHENTI, A.M.; CASTRO, C.R.T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 473 - 484, 2014.

MÜLLER, M. D.; NOGUEIRA, G. S.; CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. F.; CASTRO, R. V. O.; FERNANDES, E. N. Economics analysis of an agrosilvipastoral system for a mountainous area in Zona da Mata mineira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1148-1153, 2011.

NAIR, P. K. R. Classification of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 3, n. 2, p. 97-128, 1985.

NASCIMENTO, M. C.; RIVA, R.D.D.; CHAGAS, C. S.; OLIVEIRA, H.; DIAS, L.E.; FILHO, E.I.F.; SOARES, V.P. Uso de imagens do sensor ASTER na identificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p.196-202, 2006.

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**, v. 32, n. 5, p. 855-860, 2008.

NUNES, W. A. G. A.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GOMES, F. H. Relação solo-paisagem-material de origem e gênese de alguns solos no domínio do “Mar de Morros”, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 341-354, 2001.

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

ÖZESMI, S. L. ; TAN, C. O. ; ÖZESMI, U. Methodological issues in building, training and testing artificial neural network in ecological applications. **Ecological Modelling**, v. 195,n. 1, p. 83-93, 2006.

PARRESOL, B. R.; HOTVEDT, J. E.; CAO, Q. V. "A Volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 17, n.3, p. 250-259, 1987.

PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H.G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUSA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, v.87, n.6, p.1285-1307, 2013.

PEREIRA, M. C. T.; SALOMÃO, L. C. S.; SILVA, S. O.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA NETO, S. P.; COUTO, F. A. D. Crescimento e produção de primeiro ciclo da bananeira “prata anã” (AAB) em sete espaçamentos, em Visconde do Rio Branco, MG. **Revista Ceres**, v.46, n. 263, p. 53-66, 1999.

Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura : plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília : MAPA/ACS, 2012. 173 p.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX,F.; REAL, P. **Mensura forestal**. Costa Rica: IICA, 586p. 1997. (Série Investigação e Educação em Desenvolvimento Sustentado).

RADAMBRASIL, Projeto. Levantamento de Recursos Naturais: Folha SF.23/24 Rio/Vitória. Rio de Janeiro: Projeto RADAMBRASIL, 1983. 780p.

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, n. 1, p. 109-128, 2012.

RODRIGUES, E. F.; OLIVEIRA, T. F.; MADRUGA, M. R.; SILVEIRA, A. M. A. Um método para determinar o volume comercial de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v.28, n.1, p.16-23, 2010.

SARAIVA D. T.; FERREIRA, R. L.; TEIXEIRA, C. C.; GOMES, R. J.; OLIVEIRA NETO, S. N.; TORRES, C. M. M. E. Extension events of integrated crop-livestock-forest in the Zona da Mata Mineira, Brazil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA, 3, 2015. **Anais...** Brasília: 2015. Disponível em <http://wcclf2015.com.br/anais/busca/index.php?lang=pt>. Acesso em: 10 \08 \2015

SCHIKOWSKI, A. B.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, A. R. Estudo da forma do fuste utilizando redes neurais artificiais. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 35, n. 82, p. 119-127, 2015.

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

SCOLFORO, J. R. S.; **Biometria florestal**: Parte I: Modelos de regressão linear e não linear; Parte II: Modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

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**, v.33, n.6, p.1133-1139, 2009.

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. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 367-376, 2011.

SILVA, S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; OBOLARI, A. M. M.; SCHETTINI, B.L.S. Avaliação do uso da regressão e de rede neurais artificial em sistema silvipastoril para a modelagem do afilamento do fuste de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**. v. 13, n.23, p. 189-199, 2016.

SILVEIRA, D. P.; LEITE, H. G.; SILVEIRA, V. P.; MELIDO, R. C. N. Classificação de árvores de eucalipto para postes em sistemas agroflorestais. **Revista Árvore**, v.35, n.4, p.875-872, 2011.

SILVESTRE, R.; BONAZZA, M.; STANG, M.; LIMA, G. C. P.; KOEPEL, D. A.; MARCO, F. T.; CIARNOSCHI, L. Dom; SCARIOT, R.; MORÊS, D. F. Equações volumétricas em povoamentos de *Pinus taeda* L. no município de Lages-SC. **Nativa**, v.2, n.1, p. 01-05, 2014.

SOARES, T. S.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, S. O.; MELLO, J. M. D. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p.845-854, 2004.

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

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

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

THIERSCH, C. R. **Uma nova proposta metodológica para cubagem rigorosa e ajuste de modelos hipsométricos.** 2007. 75p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

THOMÉ, A. C. G. **Redes Neurais: uma ferramenta para KDD e Data Mining.** Disponível em: [http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat\\_didatico](http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat_didatico). Acessado em [25/05/2015](#).

VALE, R. S.; COUTO, L.; SILVA, M.L.; GARCIA, R.; ALMEIDA, J.C. C. LANI, J. L. Análise da viabilidade econômica de um sistema silvipastoril com eucalipto para a Zona da Mata de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, v.1, n. 2, p.107-120, 2004.