

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**TÉCNICAS DE MODELAGEM FLORESTAL EMPREGADAS NA  
ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE EUCALIPTO**

Estudante: Tiago Alves de Araújo  
Orientador: Dr. Reginaldo Sérgio Pereira  
Ms. Fabrícia Conceição Menez Mota

Projeto de pesquisa apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Florestal

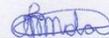
Brasília, 5 de Setembro de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

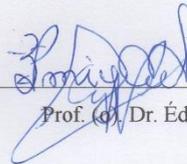
**TÉCNICAS DE MODELAGEM FLORESTAL EMPREGADAS NA  
ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA DE EUCALIPTO**

Discente: Tiago Alves de Araújo  
Matrícula: 09/0134133

Menção: SS  
Banca Examinadora



\_\_\_\_\_  
MSc. Fabricia Conceição Menez Mota  
**Orientadora**



\_\_\_\_\_  
Prof. (a) Dr. Éder Pereira Miguel  
**Examinador**



\_\_\_\_\_  
MSc. Ilvan Medeiros Lustosa Júnior  
**Examinador**

Brasília, 5 de Setembro de 2016

## **DEDICAÇÃO**

A Deus e a minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por me ajudar em todos os momentos e não me abandonar permitindo que eu entrasse na UnB.

Aos meus pais e minhas irmãs, pois me apoiaram e tiveram muita paciência comigo.

Aos meus irmãos da igreja pelas orações.

Agradeço a minha orientadora Fabrícia pela dedicação e o esforço para me ensinar o conteúdo. Pelo aprendizado no campo e principalmente pela amizade e compreensão.

Ao professor Éder Pereira e ao mestre Ilvan Medeiros pelas críticas, sugestões e correções para este trabalho e meu aprendizado.

Aos estudantes Eduardo, Fabiula, Bruna, Bianca e Maria Helena na realização do trabalho de campo.

Aos funcionários da FAL Geraldo, Sebastião e Zico na coleta de dados.

À todos que de alguma forma contribuíram para conclusão de mais uma etapa na minha vida.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABELAS.....	6
RESUMO.....	7
ABSTRATC.....	8
1 – INTRODUÇÃO.....	9
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 – Modelos volumétricos.....	10
2.2 – Redes Neurais Artificiais.....	11
3 – MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 – Caracterização da área de estudo.....	11
3.2 – Técnicas empregadas na estimativa volumétrica.....	12
3.2.1 – Modelos volumétricos.....	13
3.2.2 – Redes Neurais Artificiais.....	15
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
5 – CONCLUSÃO.....	25
6 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	25

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. ....	17
Figura 2. ....	19
Figura 3. ....	20
Figura 4. ....	23
Figura 5. ....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. ....	13
Tabela 2. ....	15
Tabela 3. ....	16
Tabela 4. ....	17
Tabela 5. ....	19
Tabela 6. ....	24
Tabela 7. ....	24

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estimar a produção volumétrica de um híbrido clonal de *Eucalyptus grandis x urophylla* por meio de modelos volumétricos tradicionais e com a utilização de RNA.

Redes neurais artificiais do tipo *MultilayerPerceptron* com algoritmo *backpropagation* e função de ativação logística usando o diâmetro e a altura total da árvore como variáveis preditoras conseguem estimar de maneira precisa o volume de um híbrido de *Eucalyptus grandis x urophylla* com 23 meses de idade.

O modelo de Schumacher e Hall foi o que melhor se ajustou para o presente trabalho na estimativa do volume, porém as redes neurais artificiais foram melhores do que os modelos convencionais.

**Palavras-chaves:** *Eucalyptus grandis x urophylla*, modelos volumétricos, RNA, Schumacher e Hall.

## ABSTRACT

The objective of this study was to estimate the volume production of a hybrid clone of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* through traditional volumetric models and the use of RNA.

Artificial neural networks *MultilayerPerceptron* type with backpropagation algorithm and activation function logistics using the diameter and the total tree height as predictor variables can estimate accurately the volume of a hybrid of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with 23 months old.

The model of Schumacher and Hall was the best fit for this study to estimate the volume, but the artificial neural networks were better than conventional models.

**Keywords:** *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, volumetric models, RNA, Schumacher and Hall.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor florestal possui grande importância na balança comercial nacional e equivale a 5,5% do PIB industrial (IBÁ, 2015), sendo responsável pela geração de empregos, renda e arrecadação de tributos (FERNANDES, 2013). Segundo esse autor, esse setor é o principal fornecedor de matéria-prima para o desenvolvimento da indústria nacional de base florestal.

A idade de corte no Brasil para eucalipto varia em função da utilidade da madeira (JUVENAL; MATTOS, 2002). De acordo com os autores, as indústrias de celulose e papel utilizam um ciclo médio de corte de 7 anos e a indústria moveleira de 12 anos. Enquanto que para a produção de energia esse ciclo varia de 4 a 5 anos (OLIVEIRA et al., 2010).

Um setor que tem se destacado na indústria florestal é os plantios florestais. O Brasil em 2015 apresentou uma área de 7,8 milhões de hectares de árvores plantadas, onde os plantios de eucalipto ocupavam 5,6 milhões de hectares (IBÁ, 2015). O gênero *Eucalyptus* tem sido plantado largamente devido ao seu rápido crescimento fornecendo grande quantidade de madeira e outras matérias-primas para diversas finalidades (BARBOSA, 2010).

Para esse setor é de extrema importância conhecer o volume da madeira seja para sua valorização ou para o uso social, ecológico e econômico correto (MIGUEL et al., 2010). Segundo esses autores o planejamento, ordenamento e o uso da madeira, exigem cada vez mais uma maior precisão na determinação da produção volumétrica.

A estimativa do volume de um povoamento florestal geralmente é realizada através de inventários, onde são feitas inferências sobre os parâmetros como diâmetro, altura, número de árvores e volume (MACHADO et al., 2000). O volume de madeira pode ser obtido pela aplicação de modelos volumétricos que são equações desenvolvidas para estimar o volume de povoamentos florestais (MIRANDA et al., 2015; SILVA, 2008).

Foram criados e testados muitos modelos de volume como o de Schumacher e Hall, Husch, Meyer dentre outros, entretanto a escolha do melhor modelo varia para cada caso, pois o desempenho depende da espécie, do espaçamento, do regime de corte e da classe de idade (MACHADO et al., 2002).

Apesar da consagração de alguns modelos em muitas situações não é possível gerar equações volumétricas como no caso dos plantios clonais e experimentais, onde não é possível derrubar as árvores (CAMPOS; LEITE, 2006). Com o intuito de aumentar a exatidão para determinar o volume e reduzir os custos surgiram novas técnicas dentre os quais destaca-se as Redes Neurais Artificiais - RNA (GORGENS et al., 2009; LEITE et al., 2011).

A Rede Neural Artificial é um modelo computacional composto por elementos de processamento dispostos em camadas e interligados entre si que calculam determinadas funções (BRAGA et al., 2007). Esse modelo tem sido utilizado para estimar altura de árvores, para descrever a forma do fuste e para calcular o volume do fuste (BINOTI, 2012; MARTINS et al., 2016; RIBEIRO et al., 2016).

O objetivo do presente trabalho foi estimar a produção volumétrica de um híbrido clonal de *Eucalyptus grandis x urophylla* por meio de modelos volumétricos tradicionais e com a utilização de RNA.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Modelos volumétricos**

Os modelos volumétricos são essenciais para tomada de decisão (SANTOS, 2012). A estimativa do volume é feita por meio da altura total e do diâmetro a altura do peito (MACHADO; FILHO, 2009). Primeiramente é estimado o volume individual de cada árvore, em seguida é estimado o volume das parcelas que por sua vez são projetados para hectare e para o povoamento todo (MIGUEL et al., 2010).

Os modelos volumétricos podem ser divididos em simples e dupla entrada. Para as equações de simples entrada o diâmetro deve estar fortemente correlacionado com altura, ou seja, o diâmetro explica bem o desenvolvimento da altura. Por outro lado, equações de dupla entrada o volume é estimado em função do diâmetro e da altura (CAMPOS; LEITE, 2009; MIGUEL, 2009; SCOLFORO, 1997).

O modelo mais usado no setor florestal é de Schumacher e Hall (1933), este quase sempre apresenta estimativas não tendenciosas, ou seja, não possui erros sistemáticos altos nem baixos (CAMPOS; LEITE, 2009). Contudo, em algumas situações esse modelo é inferior a outros como no caso do trabalho Cerdeira (2012) que estudando modelos para quantificação do volume de diferentes sortimentos em plantio de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* encontrou que o modelo de Takata foi

superior ao de Schumacher e Hall. Por isso, o ajuste de vários modelos se faz necessário para identificar o melhor por meio de análises estatísticas (MACHADO et al., 2002; THOMAS et al., 2006)

Miguel e Leal (2012) estudando equações volumétricas para *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região norte do Goiás determinaram que o melhor modelo que se ajustava foi de Schumacher e Hall (1993) encontrando valores de R<sup>2</sup> ajustado de 99,70%.

## **2.2 Redes Neurais Artificiais**

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são sistemas computacionais formados por unidades de processamento simples interligados entre si para exercer uma tarefa (BINOTI et al., 2013). As RNAs são construídas por camadas de entrada, conexões, camadas intermediárias e camada de saída (BINOTI, 2012).

Essas redes recebem informações e processam os dados ponderando o resultado e fornecendo uma única resposta (HAYKIN, 2001; BRAGA et al., 2007). As redes neurais artificiais (RNA) têm apresentado melhores resultados em relação às técnicas de regressão isso acontece devido fatores como a habilidade de aprender e generalizar, a capacidade de utilizar variáveis qualitativas e quantitativas, por apresentar estrutura distribuída em camadas e por ser tolerantes a erros (HAYKIN, 2001).

Essa ferramenta tem aprimorado diversas técnicas na dendrometria e nos inventários resultando em uma maior precisão na estimativa da produção, auxiliando na tomada de decisão (PENG; WEN, 1999; CASTELLANOS et al., 2007). As redes neurais artificiais têm sido utilizadas em diversas áreas nas ciências florestais entre elas na modelagem de volume (MIGUEL et al., 2015)

Silva et al. (2016) estimando o volume de *Eucalyptus spp* utilizando as redes neurais observaram que o uso dessa ferramenta gerou resultados confiáveis encontrando valores de RMSE (%) de 9,94 e 10,28 para o volume comercial e total respectivamente.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Caracterização da área de estudo**

O estudo foi realizado em um povoamento de híbrido clonal de *Eucalyptus grandis x urophylla* com 23 meses, pertencente a Fazenda Água Limpa (FAL),

localizada no Distrito Federal, distando 20 km ao sul da cidade de Brasília (LIBANO; FELFILI 2006).

A altitude média é de 1100 m e conforme a classificação de Köpen o clima da região é do tipo Aw, sendo caracterizado por duas estações bem definidas (quente e chuvosa,) que ocorrem de outubro a abril, e outra fria e seca de maio a setembro (NIMER, 1989). A temperatura média é de 22,1°C com precipitação média anual de 1468,6 mm. O solo predominante na área é o Latossolo Vermelho Amarelo, pobre em nutrientes e com alto teor de alumínio (LACERDA et al., 2007).

### 3.2 Técnicas empregadas na estimativa volumétrica

Foi realizada a cubagem rigorosa de 60 árvores do povoamento pelo método destrutivo e o volume real das secções transversais das toras foi calculado de acordo com o método de Smalian. O volume total do fuste de uma árvore foi calculado pela seguinte expressão:

$$V = \sum (v_i + v_n + v_{n-1}) + v_p$$

Onde:

$v_i$  = volume da secção;

$v_p$  = volume da ponta

Em que,

$$v_i = \frac{(g_i + g_{i+1}) * L}{2}$$

Onde:

$v_i$  = volume da secção considerada

$g_i$  = área seccional do extremo da secção

$g_{i+1}$  = área seccional do outro extremo de secção;

$L$  = comprimento da secção.

Em que,

$$v_p = \frac{1}{3} * (g_n * l_p)$$

$v_p$  = volume da ponta

$g_n$  = área seccional da ponta

$l_p$  = comprimento da ponta

### 3.2.1 Modelos volumétricos

Os dados provenientes da cubagem foram divididos aleatoriamente em dois grupos, um para o ajuste dos modelos (48 árvores) e outro para validação (12 árvores). Foram ajustados cinco modelos para análise volumétrica (Tabela 1). Os modelos lineares foram ajustados pelo programa Microsoft Office Excel e o não linear pelo programa Statistica 13.0 (STATSOFT, INC, 2013).

Tabela 1. Modelos volumétricos utilizados para o ajuste.

Autor		Modelo
Husch	Linear	$LnV = \beta_0 + \beta_1 LnDAP$
Meyer	Linear	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \beta_3 DAPH + \beta_4 DAP^2 H + \beta_5 H$
Spurr	Linear	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 H$
Naslund	Linear	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 DAP^2 H + \beta_3 DAPH^2 + \beta_4 H^2$
Schumacher & Hall	Não-linear	$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * H^{\beta_2}$

Para análise da estimativa foram calculadas as seguintes estatísticas de qualidade de ajustes: a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE %), o erro padrão da estimativa absoluto e em porcentagem (Syx e Syx%), as Bias e o coeficiente de correlação. Foram feitos também análise da distribuição gráfica dos resíduos dos volumes observados e a relação entre valores observados e estimados.

A raiz quadrada do erro quadrático médio RMSE (%) foi calculada pela seguinte expressão:

$$RMSE(\%) = \frac{100}{\bar{y}} * \sqrt{\frac{\sum_i^n (Ye - Yo)^2}{n}}$$

Onde:

$n$  = valor total dos dados;

$\bar{y}$  = média dos valores observados

$Ye$  = volume estimado;

$Yo$  = volume observado;

O erro padrão da estimativa absoluto e o relativo foram obtidos pela expressão:

$$Syx = \sqrt{\frac{(Yo - Ye)^2}{n - p}} \quad Syx(\%) = \frac{syx}{Ymo} * 100$$

Onde:

$S_{yx}$  = erro padrão da estimativa absoluto;

$S_{yx}(\%)$  = erro padrão da estimativa relativo;

$Y_o$  = volume observado;

$Y_e$  = volume estimado;

$Y_{mo}$  = volume médio observado;

$n$  = número de observações;

$p$  = número de coeficientes

As Bias foram obtidas pelo seguinte cálculo:

$$BIAS = \sum_{i=1}^n (Y_e - Y_o)$$

Onde:

$Y_e$  = volume estimado;

$Y_o$  = volume observado;

O coeficiente de correlação  $r_{y\hat{y}}$  foi calculado pela seguinte fórmula:

$$r_{y\hat{y}} = \frac{n \sum Y_o Y_e - (\sum Y_o)(\sum Y_e)}{\sqrt{n \sum Y_o^2 - (\sum Y_o)^2} * \sqrt{n \sum Y_e^2 - (\sum Y_e)^2}}$$

Onde:

$r_{y\hat{y}}$  = coeficiente de correlação

$n$  = número de dados;

$Y_o$  = volume observado;

$Y_e$  = volume estimado;

Para o modelo logarítmico foi feita a correção utilizando o fator de Meyer que é dado pela expressão:

$$f.m = e^{0,5*QMR}$$

Onde:

$f.m$  = fator de correção de Meyer;

$QMR$  = quadrado médio do resíduo.

### 3.2.2 Redes Neurais Artificiais

Foram utilizadas as mesmas árvores do ajuste dos modelos volumétricos para o treinamento das redes (48 árvores) e para validação (12 árvores). As variáveis consideradas foram diâmetro a 1,30 de altura, altura total e o volume (Tabela 2).

Tabela 2. Características dendrométricas das 60 árvores.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
DAP (cm)	1,80	10,80	5,98	2,78
Altura total (m)	2,70	14,20	7,93	2,94
Volume (m <sup>3</sup> )	0,00	0,06	0,02	0,02

O emprego dos dados com a RNA foi viabilizado pelo *software* Statistica 13.0 (STATSOFT, INC, 2013). Para a estimativa do volume foram treinadas 1000 redes do tipo MLP (*MultilayerPerceptron*), constituída por dois neurônios na camada de entrada (DAP e H) e uma camada de saída com um neurônio (Volume) utilizando como algoritmo de treinamento o *backpropagation*.

O número de neurônios na camada oculta foi otimizado pela ferramenta *IntelligentProblem Solver* do Statistica 13.0. Contudo, essa ferramenta não permite ao modelador selecionar o critério de parada ficando a cargo do programa estabelecer o fim do treinamento. Os pesos das redes foram gerados aleatoriamente pelo próprio software. A função de ativação empregada na camada intermediária e de saída foi a logística.

A taxa de aprendizagem e o termo *momentum* foram otimizados pelo *IntelligentProblem Solver*. Essa ferramenta normalizou os dados em intervalos de 0 a 1. O processo de treinamento foi do tipo *feedforward*, pelo método supervisionado. Nesse método as variáveis de entrada e saída são indicadas para a rede que utiliza o algoritmo de fluxo de dados unidirecional, sem ciclos (HAYCKIN, 2001).

Posteriormente ao processo de treinamento foram retidas as cinco melhores RNAs pelo software. Dentre essas redes foi selecionada uma para a validação dos dados a escolha da RNA foi feita a partir das estatísticas de qualidade e do gráfico do resíduo em porcentagem e da relação entre volume observado pelo estimado.

Foram calculados o erro padrão da estimativa absoluto e em porcentagem (Syx e Syx%), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE %), as Bias e o coeficiente de correlação ( $r_{y\hat{y}}$ ).

Em seguida foi feita a análise do desempenho do melhor modelo tradicional e da RNA na estimativa do volume. Foram comparadas as estatísticas de qualidade citadas anteriormente e o gráfico de dispersão.

Com os dados do volume real foi feito o teste de Shapiro-Wilks caso os dados das 60 árvores apresentassem distribuição normal os dados da validação do volume real e dos volumes estimados pela RNA e pela regressão seriam submetidos a análise de variância (ANOVA), senão ao teste de Kruskal-Wallis e da diferença agregada DA (%) para verificar se existe diferença significativa entre eles. Esses testes foram realizados através do programa Microsoft Office Excel pelo software Statistica 13.0 (STATSOFT, INC, 2013).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os modelos volumétricos foram ajustados cinco modelos de simples e dupla entrada. A Tabela 3 mostra os resultados dos estimadores de parâmetro dos modelos volumétricos

Tabela 3 – Estimadores de parâmetros obtidos no ajuste dos modelos volumétricos.

<b>Autor</b>	<b><math>\beta_0</math></b>	<b><math>\beta_1</math></b>	<b><math>\beta_2</math></b>	<b><math>\beta_3</math></b>	<b><math>\beta_4</math></b>	<b><math>\beta_5</math></b>
<b>Husch</b>	-8,38393	2,28087	–	–	–	–
<b>Meyer</b>	0,00267	-0,00049	0,000102	0,00032	$7,6 * 10^{-6}$	-0,00094
<b>Spurr</b>	0,001738	$3,6 * 10^{-5}$	–	–	–	–
<b>Naslund</b>	0,00015	0,00030	$-9,9 * 10^{-6}$	$2,3 * 10^{-5}$	$-6 * 10^{-5}$	–
<b>Schumacher e Hall</b>	0,000117	1,70426	0,80994	–	–	–

Por meio da Tabela 4 percebe-se que os cinco modelos apresentaram bom desempenho estatístico quanto ao erro padrão da estimativa relativo. Miguel e Leal (2012) estudando *Eucalyptus urophylla* registraram valores de erro padrão da estimativa relativo de 13,37%, 7,38%, 9,18%, 8,16% e 8,72% para os modelos de Husch, Meyer, Spurr, Naslund e Schumacher e Hall respectivamente.

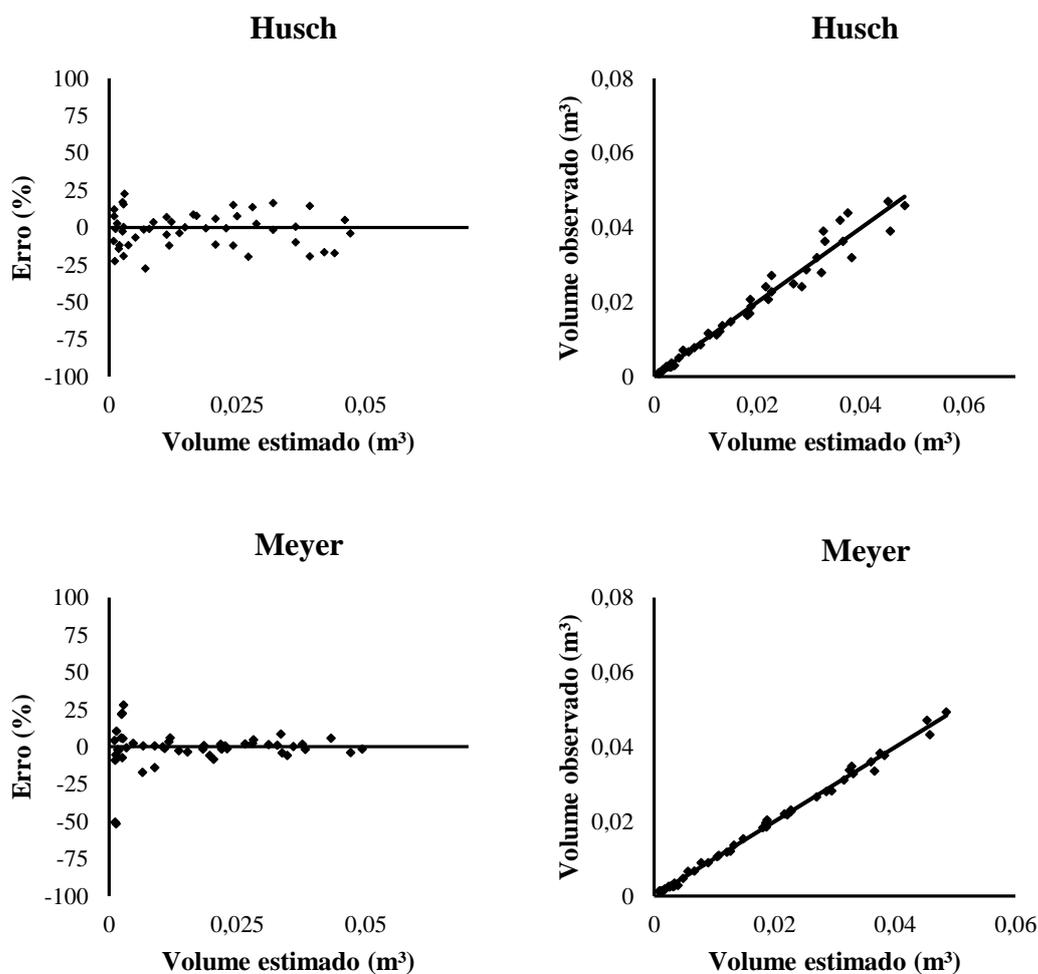
Os resultados do coeficiente de correlação também foram satisfatórios, onde esses valores variaram entre 0,9842 e 0,9979. Segundo Cohen (1988) o coeficiente de correlação acima de 0,9 é quase perfeito. Silva et al. (2015) ajustando modelos volumétricos para três clones de *Eucalyptus* em Mineiros em Goiás encontraram  $r_{\hat{y}}$  de 0,9695 para o modelo de Husch e 0,9693 para Schumacher e Hall.

Tabela 4 – Estatística de ajuste e precisão dos modelos volumétricos.

Parâmetros	Husch	Meyer	Spurr	Naslund	Schumacher e Hall
Syx	0,00259	0,00096	0,00141	0,00095	0,00085
Syx (%)	15,44	5,73	8,43	5,69	5,06
RMSE (%)	15,44	5,73	8,43	5,69	5,06
Correlação	0,9842	0,9979	0,9952	0,9979	0,9978
Bias	-0,8089	$-3,40 * 10^{-16}$	$2,42 * 10^{-17}$	$4,51 * 10^{-17}$	0,0010

Os modelos de dupla entrada (Meyer, Spurr, Naslund e Schumacher e Hall) foram superiores ao de simples entrada (Husch). Esse resultado está de acordo com a literatura visto que os modelos que utilizam o diâmetro e a altura produzem os melhores resultados (BAIMA et al., 2001).

Na Figura 1 mostra a distribuição gráfica dos resíduos para o ajuste dos cinco modelos.



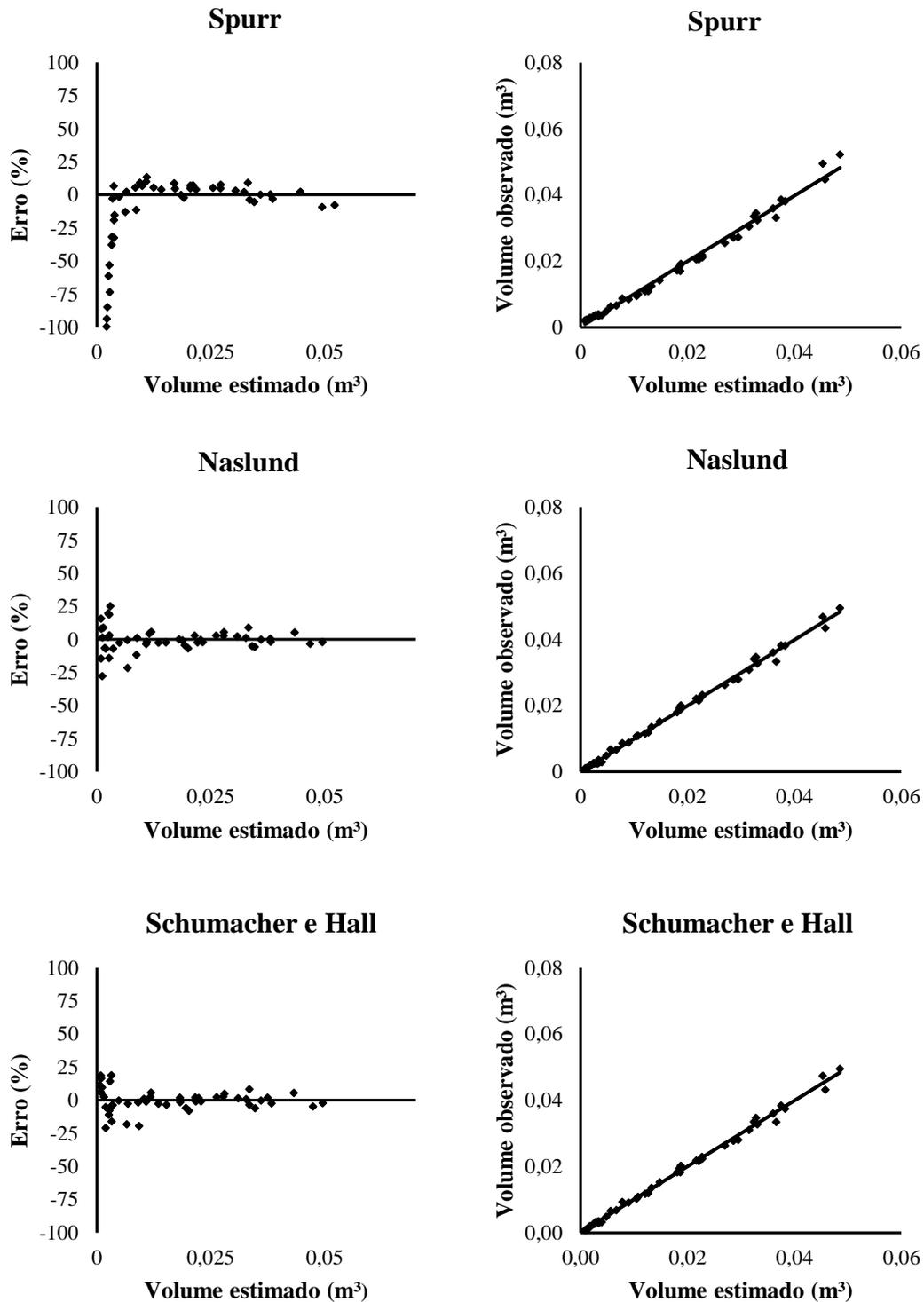


Figura 1. Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP e do volume estimado.

O modelo de Husch apresentou uma distribuição residual mais dispersa dos que os outros modelos. Já no modelo de Spurr foi visível a subestimação para volumes menores. Por outro lado, os modelos de Meyer e Naslund apresentaram uma boa

distribuição de resíduos, porém os dois foram caracterizados por inflacionar os valores de menor volume.

Já o modelo de Schumacher e Hall mostrou melhor desempenho em comparação ao gráfico de resíduos e as estatísticas de precisão, sendo escolhido para estimar o volume do presente trabalho. Sales et al. (2015) ajustando quatro modelos volumétricos para clone *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* constatou que o de Schumacher e Hall apresentou melhor precisão.

A validação dos dados foi feita com o modelo de Schumacher. Na figura 2 estão apresentados os erros percentuais deste modelo para a validação.

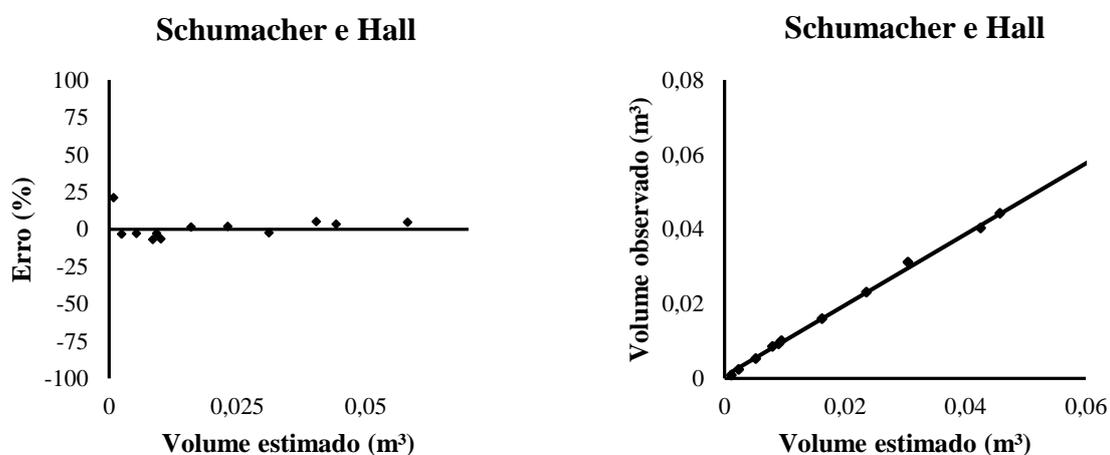


Figura 2. Dispersão dos erros percentuais em função dos volumes totais observados e a relação entre valores observados e estimados na validação.

Na dispersão de resíduos é notório perceber a superestimação e a subestimação do volume. Fato é que na validação, os resíduos ficaram entre erros de -6,89 a 21,04%. Com relação as redes neurais a Tabela 5 apresenta as RNAs retiradas no processo de treinamento e as respectivas estatísticas.

Tabela 5. Características das redes neurais artificiais e estatísticas das estimativas do volume.

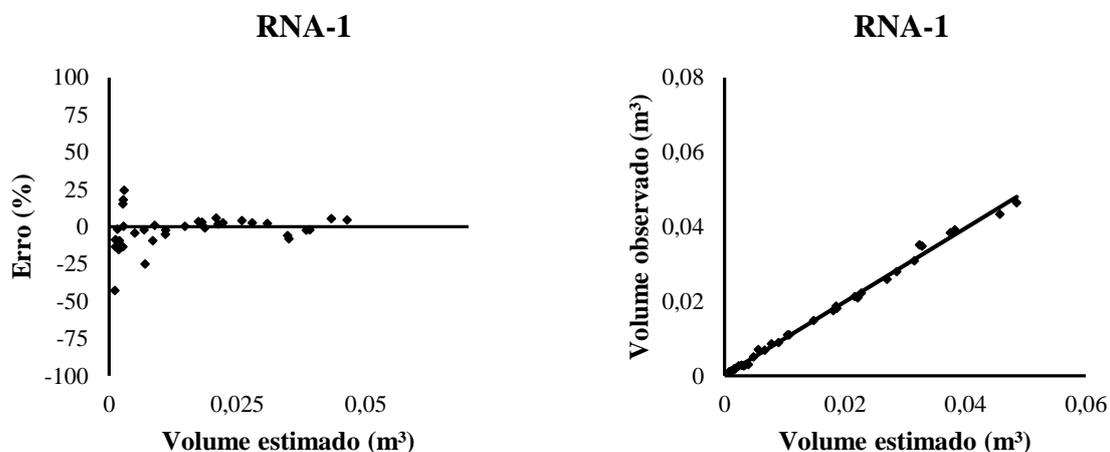
Redes selecionadas	Arquitetura	Função de ativação	RMSE (%)	Bias	Syx	Syx (%)	$r_{yy}$
RNA 1	MLP 2-3-1	Logística	5,33	0,00136	0,00084	5,33	0,9976
RNA 2	MLP 2-8-1	Logística	6,30	0,00243	0,00099	6,30	0,9966
RNA 3	MLP 2-6-1	Logística	5,53	-0,00093	0,00087	5,53	0,9972
RNA 4	MLP 2-7-1	Logística	6,03	0,00576	0,00095	6,03	0,9968
RNA 5	MLP 2-5-1	Logística	4,92	0,00382	0,00077	4,92	0,9978

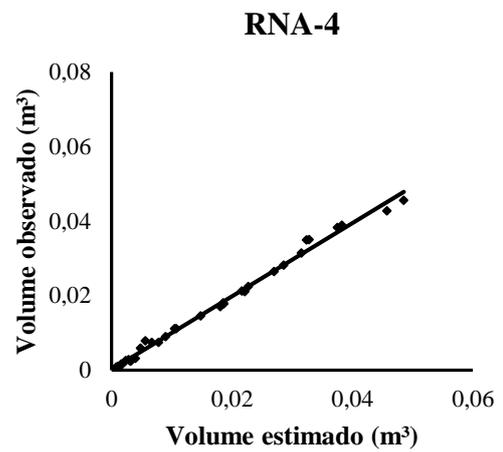
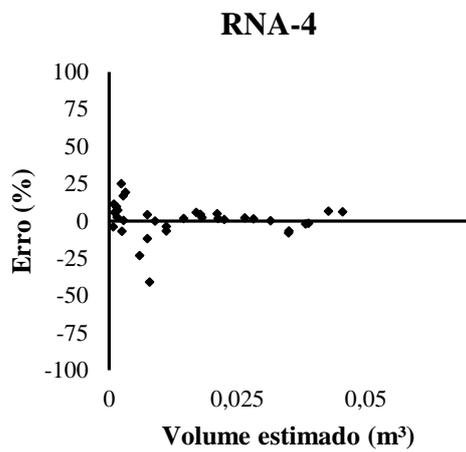
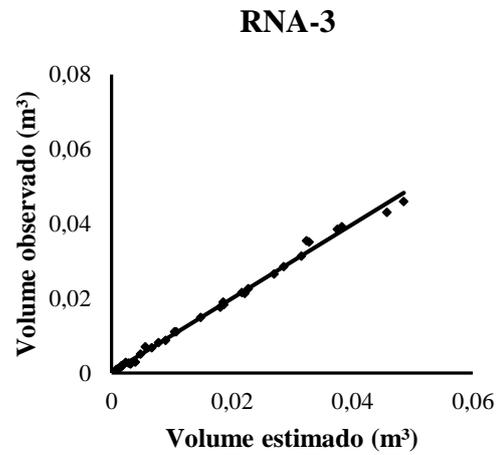
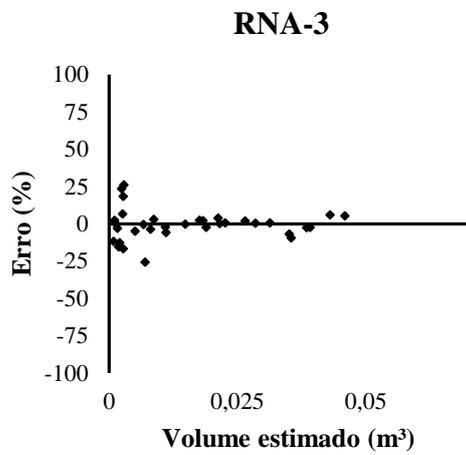
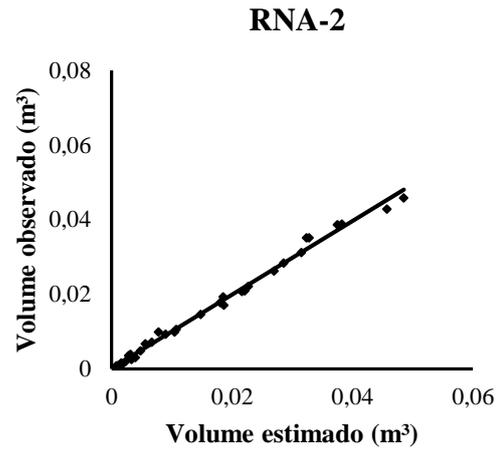
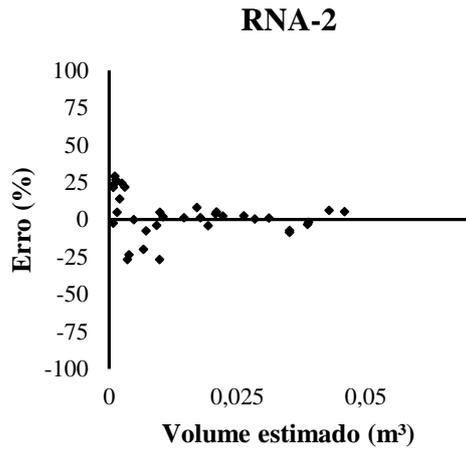
A arquitetura MLP, o algoritmo de aprendizagem *backpropagation* e a função de ativação logística se mostraram apropriados para a estimativa do volume. Isso pode ser observado pelo elevado valor da correlação e os baixos valores de RMSE (%),  $S_{yx}$ ,  $S_{xy}$  (%) e Bias.

Uma justificativa para essa arquitetura ter apresentado um bom desempenho é que a configuração *MultilayerPerceptron* (MLP) possui a capacidade universal de aproximação de funções (HORKIN et al., 1989). Outro ponto do resultado ser satisfatório é o fato que o modelo de cada neurônio do MLP inclui uma função de ativação não linear esse requisito foi satisfeito pela função logística.

Apesar da função de ativação logística ser computacionalmente mais lenta de ser avaliada do que a bi-hiperbólica (XAVIER, 2005) essa função apresentou bom resultado. Miguel et al (2016) estimando o volume de um plantio de *Eucalyptus urophylla* através de Redes Neurais Artificiais com arquitetura MLP usando função de ativação sigmoideal registrou valores de RMSE (%) de 1,75 e 2,22 e correlação ( $r_{y\hat{y}}$ ) de 0,989 e 0,994.

A Figura 3 apresenta a análise gráfica dos erros percentuais para o treinamento.





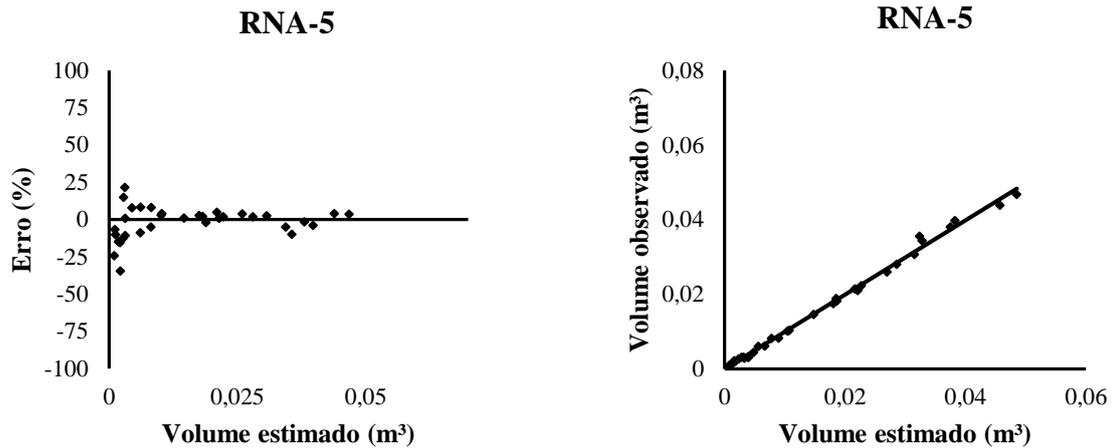


Figura 3. Dispersão dos erros percentuais em função dos volumes totais observados para a validação e relação entre valores observados e estimados na validação.

Observa-se através dos gráficos de dispersão que a diferença entre os valores reais e estimados é baixa, onde os erros de subestimação e superestimação variaram entre -42,85 a 29,13% respectivamente. Todas as redes subestimaram ou superestimaram os valores para classes de volume menores. Contudo, as cinco redes podem ser utilizadas para estimar o volume do povoamento.

O volume total observado para os dados foi 0,537488 m<sup>3</sup> e o volume total estimado pelas redes variaram entre 0,534971 e 0,538419. Estes resultados indicam que os volumes calculados por essas redes são compatíveis com a realidade.

O melhor resultado foi obtido para a RNA-5 que utilizou como arquitetura MLP 2-5-1. Apenas as RNA-3 e RNA-5 não apresentaram distribuição dos resíduos muito dispersas, além disso, a dispersão dos erros não foi tendenciosa. A validação foi feita com a RNA-5 devido o melhor desempenho do que as outras redes. Na figura 4 estão apresentados os erros percentuais desta rede para a validação.

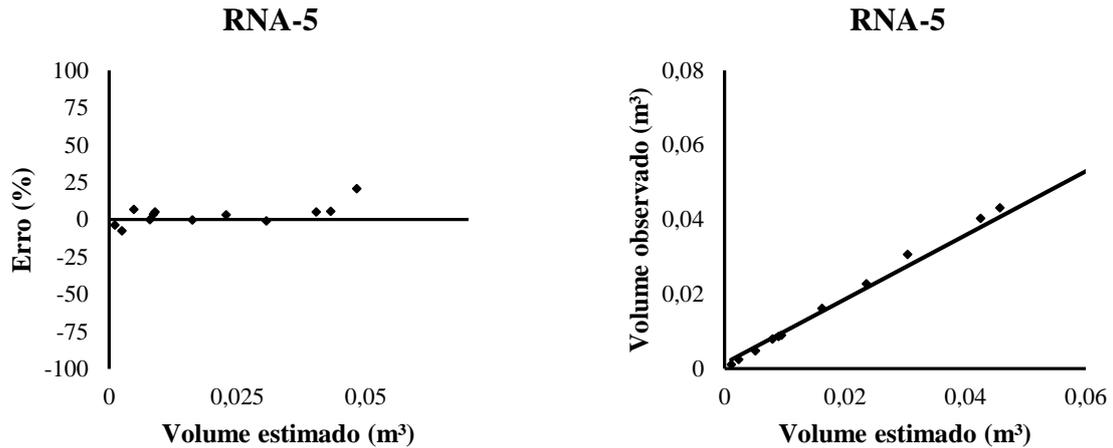


Figura 4. Dispersão dos erros percentuais em função dos volumes totais observados para a validação e relação entre valores observados e estimados na validação.

Os dados tiveram bom ajuste para na validação com erros entre -7,31% e 20,89%. Comparando o melhor modelo volumétrico (Schumacher e Hall) com a melhor rede (RNA-5) percebe-se que as distribuições gráficas dos erros em percentagem são semelhantes não apresentando tendenciosidade (Figura 5).

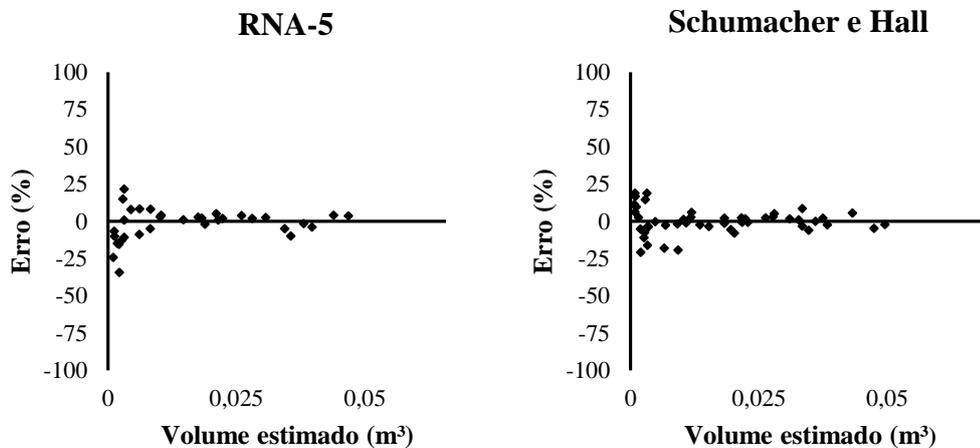


Figura 5. Dispersão dos erros percentuais em função dos volumes totais observados.

A análise gráfica dos resíduos mostra que tanto a RNA-5 como o modelo de Schumacher e Hall conseguiram estimar de forma confiável o volume. Todavia, verifica-se através das estatísticas de qualidade ligeira superioridade da RNA em estimar os valores de volume (Tabela 6).

Tabela 6. Estatísticas das estimativas.

	<b>RMSE (%)</b>	<b>Syx</b>	<b>Syx (%)</b>	<b>Bias</b>	<b><math>r_{y\hat{y}}</math></b>
RNA-5	4,92	0,00077	4,92	0,00382	0,9978
Schumacher e Hall	5,06	0,00085	5,06	0,00100	0,9978

Os valores de RMSE (%), Syx e Syx (%) da RNA-5 foram inferiores ao de Schumacher e Hall mostrando melhor precisão. Binoti et al. (2014) estimando o volume de *Eucalyptus spp* por meio de configuração de redes neurais artificiais constatou que existe pouca diferença entre o uso de RNA e o modelo de Schumacher e Hall, entretanto mostra a vantagem de utilizar as redes por causa da inclusão de variáveis categóricas.

Diversos trabalhos mostram a superioridade das RNAs em relação a procedimentos tradicionais no meio florestal. Souza (2015) estimando o volume de clones de *Eucalyptus spp* registrou melhor desempenho da RNA comparado ao modelo de Schumacher e Hall afirmando que este apresenta bons resultados, porém as redes possuem um acréscimo no resultado das estatísticas quando adiciona uma variável categórica. Leal et al. (2015) registrou melhor desempenho das redes neurais artificiais em relação ao método de regressão, pois apresentou boa adequação aos dados de entrada.

Com os dados do volume real (60 árvores) foi verificado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, onde o p-valor foi de 0,0001 evidenciando a não normalidade. Com esse resultado os dados da validação do volume real e dos volumes estimados pelo modelo de Schumacher e Hall e pela RNA-5 foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis e da diferença agregada DA (%) para comparação entre os métodos (Tabela 7).

Tabela 7. Estatísticas de validação, onde  $(\chi^2)_{D.cal}$  = valor calculado segundo teste de Kruskal-Wallis,  $(\chi^2)_{D.tab}$  = valor tabelado segundo o teste de Kruskal-Wallis, Da (%) = diferença agregada, ns= não significativo a 5%.

<b>Variável</b>	<b>Da (%)</b>	<b><math>(\chi^2)_{D.cal}</math></b>	<b><math>(\chi^2)_{D.tab}</math></b>	<b>Resultado</b>
Volume real RNA-5	1,9822	11,165	19,675	ns
Volume real Schumacher e Hall	7,4629	11,915	19,675	ns
RNA-5 Schumacher e Hall	5,5916	10,415	19,675	ns

A comparação mostrou que os valores estimados pelo modelo de Schumacher e Hall e pela a RNA-5 foram próximos do volume real não havendo diferença significativa entre as redes neurais e a regressão. Por meio da análise de Kruskal-Wallis ambos os métodos são válidos e não existe diferença estatística entre si.

Através da diferença agregada ambas as técnicas superestimaram o volume, pois apresentaram sinais positivos de DA (%) (Schumacher e Hall, 7,4629% e RNA-5, 1,9822%). Contudo, a rede neural artificial superestimou menos do que a regressão.

## 5. CONCLUSÃO

Redes neurais artificiais do tipo *MultilayerPerceptron* com algoritmo *backpropagation* e função de ativação logística usando o diâmetro e a altura total da árvore como variáveis preditoras conseguem estimar de maneira precisa o volume de um híbrido de *Eucalyptusgrandisxurophylla* com 23 meses de idade.

O modelo de Schumacher e Hall foi o que melhor se ajustou para o presente trabalho na estimativa do volume, porém as redes neurais artificiais foram melhores do que os modelos convencionais.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BAIMA A. M. V; SILVA, S. M. A; SILVA, J. N. M. A silvicultura tropical na Amazônia: Equações de volume para uma floresta tropical de terra-firme Moju-Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. DFID, p.367-392, 2001.
- BARBOSA, T. L. Influência do local de crescimento na qualidade da madeira para celulose e na susceptibilidade aos ventos. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal, oferecido pela Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, 60f, 2010.
- BINOTI, M. L. M. S. Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- BINOTI, M. L. M. S; BINOTI, D. H. B; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.37, n.4, p.639-645, 2013.

- BINOTI, D. H. B; BINOTI, M. L. M.S; LEITE, H. G. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)*, Pelotas, v.5, n.1, p.58-67, 2014.
- BRAGA, A. P; CARVALHO, A. P. L. F; LUDERMIR, T. B. *Redes neurais artificiais: teoria e aplicações*. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*, Universidade Federal de Viçosa, 2.ed. Viçosa, p.470, 2006.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*, 3. ed. Viçosa: UFV, 2009.
- CASTELLANOS, A; BLANCO, A. M; PALENCIA, V. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222, 2007.
- CERDEIRA, A. L. N. Modelos para quantificação do volume de diferentes sortimentos em plantio de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal, oferecido pela Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New Jersey: Lawrence Erlbaum, p. 569, 1988.
- FERNANDES, L. M. Estudo da rentabilidade e risco da produção de eucalipto para energia em Minas Gerais. *Informações econômicas*, SP, v.43, n.6, 2013.
- GÖRGENS, 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.
- HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. Porto Alegre: p. 900, 2001.
- HORKIN, K; STINCHCOMBE, M; WHITE, H. Multilayer feed forward network are universal approximators. *Neural Networks*, Bandera, v.2, n.5, p. 359-366, 1989.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório IBÁ – 2015. Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2014.
- JUVENAL, T.L; MATTOS, R. L. G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. *BNDES setorial*, Rio de Janeiro, n. 16, p. 3-30, 2002.
- LACERDA, M. P. C; BARBOSA, I. O; CAMPOS, P. M; PAPA, R. A. A utilização de sensoriamento remoto para o estabelecimento de relações entre vegetação nativa e classes de solos em mapeamento pedológico, Distrito Federal. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais. Florianópolis, SC, p. 3991-3996, 2007.

- LEAL, F. A; MIGUEL, E. P; MATRICARDI, E. A. T; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores. *Revista Brasileira Biometria*, São Paulo, v.33, n.2, p.233-249, 2015.
- LEITE, H; CASTRO, R; SILVA, A; JÚNIOR, C.; BINOTI, D; CASTRO, A.F; BINOTI, M. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. *Silva Lusitana*, Lisboa, v.19, n.2, p.181-195, 2011.
- LIBANO, A.M; FELFILI, J. M. Mudanças temporais na composição florística e na diversidade de um Cerrado *sensu stricto* do Brasil Central em um período de 18 anos (1985-2003). *Acta Botanica Brasilica* 20, p. 927-936, 2006.
- MACHADO, S. A; MELLO, J. M; BARROS, D. A. Comparação entre métodos para validação de volume total de madeira por unidade de área, para o pinheiro do Paraná, na região sul do Brasil. *Cerne*, Lavras, v.6, n.2, p.55-66, 2000.
- MACHADO, S. A; CONCEIÇÃO, M. B; FIGUEIREDO, D. J. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, vol. 4, n. 2, 2002.
- MACHADO, S. A; FIGUEIREDO FILHO, A. *Dendrometria*. 2. ed. – Guarapuava: Unicentro, p. 316, 2009.
- 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 árvores de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v.11, n.1, p.33-38, 2016.
- MIGUEL, E. P. Desenvolvimento de equações hipsométricas e volumétrica para estimar o volume total e comercial de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás. Curitiba. Dissertação (Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná), UFPR, 2009.
- MIGUEL, E.P; CANZI, L.F; RUFINO, R.F; SANTOS, G.A. Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde – GO. *Enciclopédia Biosfera Centro Científico Conhecer – Goiânia*, vol. 6, n.11, 2010.
- MIGUEL, E. P; LEAL, F. A. Seleção de Equações Volumétricas para a Predição do Volume Total de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na Região Norte do Estado de Goiás. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia*, v. 8, n. 14, p. 1372-1386, 2012.

- MIGUEL, E.P; REZENDE, A.V; LEAL, F.A; MATRICARDI, E. A. T; VALE, A.T; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.50, n.9, p.829-839, 2015.
- MIGUEL, E. P; MOTA, F. C. M; TEO, S. J; NASCIMENTO, R. G. M; LEAL, F. A; PEREIRA, R. S; REZENDE, A. V. Artificial intelligence tools in predicting the volume of trees within a forest stand. African Journal of Agriculture Research, v. 11, p. 1914-1923, 2016.
- MIRANDA, D. L. C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. SCIENTIA PLENA, v. 11, n. 3, 2015.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro, p.422, 1989.
- OLIVEIRA, A.C; CARNEIRO, A. C. O; VITAL, B.R; ALMEIDA, W; PEREIRA, B. L. C; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. Revista Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- PENG, C; WEN, X. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE WORKSHOP, 1999.
- RIBEIRO, R. B. S; GAMA, J. R. V; SOUZA, A. L; LEITE, H. G; SOARES, C. P. B; SILVA, G. F. Método para estimar o volume de fustes e galhos na Floresta Nacional do Tapajós. Revista Árvore, v. 40, n. 1, Viçosa, 2016.
- SALES F. C. V; SILVA, J. A. A; FERREIRA, R. L. C; GADELHA, F. H. L. Ajuste de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 663 - 670, 2015.
- SANTOS, A.T. Análise do crescimento e simulação de manejo de um plantio de *Ocotea porosa*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 12, 2012.
- SCHUMACHER, F; HALL, F. Logarithmic expression of timber-tree volume. Journal of Agricultural Research, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SCOLFORO, J. R. S. Biometria florestal 2: Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. Lavras: UFLA/FAEPE, p.292, 1997.

- SILVA, W. F. Ajuste de modelos volumétricos e de afilamento para plantios de (*Eucalyptus urophylla*) no município de Niquelândia – GO. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal, oferecido pelas Faculdades Integradas de Mineiros, Mineiros: FIMES, 2008.
- SILVA, A. J; SILVA FILHO, J. L. F; SILVA, M. D. T. da; ROQUE, C. G; CUNHA, F. F. da. Ajuste de modelos hipsométricos e volumétricos para três clones de *Eucalyptus* em Mineiros – GO. Nucleus, v.12, n.2, 2015.
- SILVA, J. P. M; LEITE, M. V. S; SOUZA; D. C; CABACINHA, C. D; ASSIS, A. L. Redes neurais artificiais para estimar volume comercial e total de *Eucalyptus spp*. In: IV Semana de Engenharia Florestal da Bahia, 2016.
- SOUZA, S. R. R. Uso de redes neurais na estimativa volumétrica de clones de *Eucalyptus spp* no pólo gesseiro do Araripe, Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, 2015.
- STATSOFT, INC. Statistica (Electronic Statistics Textbook.), Tulsa, OK, 2013.
- THOMAS, C; ANDRADE, C.M; SCHNEIDER, P.R; FINGER, C. A. G. Compactação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. Ciência Florestal, Santa Maria, v.16, n.3, p.319-327, 2006.
- XAVIER, A. E. Uma função de ativação para Redes Neurais Artificiais mais flexível e poderosa e mais rápida. Learning and Nonlinear Models – Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN), v. 1, n. 5, p. 276-282, 2005.