

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
THIAGO GARCIA DE ALMEIDA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

COMPARAÇÃO ENTRE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E MODELOS  
TRADICIONAIS DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR ALTURA E VOLUME  
EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze

CURITIBA

2015

THIAGO GARCIA DE ALMEIDA

COMPARAÇÃO ENTRE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E MODELOS  
TRADICIONAIS DE REGRESSÃO PARA ESTIMAR ALTURA E VOLUME  
EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná como requisito para a conclusão da disciplina ENGFOO6 e requisito parcial de obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr Hélio Garcia Leite

Msc. Alvaro Augusto Vieira Soares

CURITIBA

2015

Dedico...

A Randolf Zachow (*in memoriam*)

pelos sábios conselhos, ajuda e ensinamentos que compartilhou e que levarei para toda a vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao curso de Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná representando todos os funcionários e professores pelo apoio e colaborações que proporcionaram no decorrer do curso.

Ao programa Ciências sem Fronteiras que me proporcionou estudar na Universidade de Freiburg na Alemanha e por meio disso eu ter tido a oportunidade de conhecer docentes de outras instituições de ensino e que dividiram o conhecimento para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Ana Paula Dalla Corte, Hélio Garcia Leite, Vitor Afonso Hoeflich, Alexandre França Tetto, pelos importantes conselhos e contribuições que me proporcionaram.

Ao meu amigo Alvaro Augusto Vieira Soares, por ter cedido seu tempo, conhecimento, paciência no auxílio ao desenvolvimento desse trabalho.

Aos colegas de turma por todos os conselhos e ajudas.

A minha mãe Zilma Garcia de Almeida e a minha avó Maria das Dores Garcia de Almeida pelo apoio e conselhos em todos os momentos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito OBRIGADO.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho das redes neurais artificiais (RNA) para estimativas da altura total e do volume com métodos tradicionais de regressão para povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze na região sul do Brasil. As redes neurais vem se destacando como uma ferramenta alternativa na modelagem florestal com um desempenho comprovado muitas vezes superior aos métodos de regressão. Os casos abordados neste estudo tratam-se da modelagem da altura e do volume das árvores. Os dados foram provenientes de um plantio florestal que teve o inventário realizado no ano de 2004. Os softwares utilizados foram o Excel, R e *NeuroForest*. Foi utilizado tanto 100% da base de dados como diminuiu-se a intensidade amostral para comparar o comportamento dos métodos por meio das estatísticas de qualidade. Este trabalho corrobora com outros estudos em povoamentos de *Eucalyptus* e *Teca* e, nos dois casos estudados, apresentaram resultados superiores aos modelos tradicionais. Para estimativa da altura as RNA foram ligeiramente superiores tanto no uso de 100 % da base de dados quanto na diminuição da intensidade amostral. Na estimativa de volume tanto a equação de Schumacher-Hall como as RNAs obtiveram resultados satisfatórios; no entanto as RNAs se mostraram superiores. Por fim, pode-se aferir que as RNAs constituem uma nova alternativa a ser empregada na estimativa de volume e altura em povoamentos de *Araucaria angustifolia*.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Manejo Florestal. Mensuração Florestal.

## ABSTRACT

This study aimed to compare the performance of artificial neural networks to full height and volume estimates with traditional regression methods to stands of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze in southern Brazil. Neural networks has emerged as an alternative tool in forest modeling with a proven performance than the regression methods. The cases addressed in this study these are the height modeling and volume of trees. The data came from a forest plantation which had the inventory carried out in 2004. The software used was Excel, R and *NeuroForest*. It was used both 100% database as the sample intensity be decreased to compare the behavior of the methods by means of quality statistics. This academic work corroborates other studies in stands of *Eucalyptus* and *Teak* and in both cases studied, showed better results than traditional models. To estimate the height the neural networks were slightly higher in both the 100% use of the database in the sample decreased. The estimated volume both Schumacher-Hall equation as the RNAs obtained satisfactory results; however the RNAs were superior. Finally, one can infer that the RNAs represent a new alternative to be used in estimating the volume and height in stands of *Araucaria angustifolia*.

Key words: Artificial Intelligence. Forest Management. Forest Measurement

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO III

FIGURA 1 – PROCEDIMENTO REALIZADO PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL EM POVOAMENTO DE *A. Angustifolia*... 27

FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÕES DOS RESÍDUOS EM PERCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO A 1,30 DO SOLO (DAP), PARA OS SEIS MODELOS AJUSTADOS PARA POVOAMENTOS PUROS EQUIÂNEOS DE *Araucaria angustifolia* NO SUL DO BRASIL. .... 34

FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PERCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO PEITO (DAP), PARA A REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA) E A EQUAÇÃO DE STOFFELS..... 36

FIGURA 4 - ALTURAS TOTAIS OBSERVADAS E ESTIMADAS PARA *Araucaria angustifolia* UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS E A EQUAÇÃO DE STOFFELS. A LINHA TRACEJADA, PARA FINS DE COMPARAÇÃO, REPRESENTA A RELAÇÃO 1:1, OU SEJA, A CORRESPONDÊNCIA PERFEITA ENTRE A ALTURA ESTIMADA E A OBSERVADA..... 37

FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PERCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO PEITO (DAP), PARA VALIDAÇÃO DAS AMOSTRAGENS NAS REDES NEURAS E NA REGRESSÃO. .... 39

### CAPÍTULO IV

FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS EM PERCENTAGEM EM FUNÇÃO DO VOLUME PARA OS SEIS MODELOS AJUSTADOS PARA POVOAMENTOS PUROS EQUIÂNEOS DE *Araucaria angustifolia* NO SUL DO BRASIL..... 50

FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PERCENTAGEM EM FUNÇÃO DO VOLUME EM METROS CÚBICOS PARA A EQUAÇÃO DE SCHUMACHER-HALL E PARA A REDE NEURAL ARTIFICIAL..... 52

FIGURA 8 - VOLUMES OBSERVADOS E ESTIMADOS PARA *Araucaria angustifolia* UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE SCHUMACHER-HALL E A MELHOR REDE NEURAL SELECIONADA. A LINHA TRACEJADA, PARA FINS DE COMPARAÇÃO, REPRESENTA A RELAÇÃO 1:1, OU SEJA, A CORRESPONDÊNCIA PERFEITA ENTRE A ALTURA ESTIMADA E A OBSERVADA..... 52

FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PERCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO PEITO (DAP), PARA VALIDAÇÃO DAS AMOSTRAGENS NAS REDES NEURAS E NA REGRESSÃO. .... 54

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO III

TABELA 1 - MODELOS DE REGRESSÕES TESTADAS PARA ESTIMAR ALTURA TOTAL EM FUNÇÃO DO DAP EM POVOAMENTOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> . ...	28
TABELA 2 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE PARA OS MODELOS HIPSOMÉTRICOS EM POVOAMENTOS DE <i>ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA</i> . .....	33
TABELA 3 - COEFICIENTES E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS FORNECIDOS PELO <i>NEUROFOREST</i> 3.0 PARA SELEÇÃO DA MELHOR REDE. ....	35
TABELA 4 - ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE PARA A MODELAGEM DA ALTURA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO SOLO (DAP) DE ÁRVORES DE <i>Araucaria angustifolia</i> , REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA) E A EQUAÇÃO DE STOFFELS. ....	36
TABELA 5 - ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO CORRESPONDENTES ÀS REDUÇÕES AMOSTRAIS NA MODELAGEM DA ALTURA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO SOLO (DAP) DE ÁRVORE DE <i>ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA</i> , UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E A EQUAÇÃO DE STOFFELS. ....	38

### CAPÍTULO IV

TABELA 6 - EQUAÇÕES DE REGRESSÕES TESTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DO DAP EM POVOAMENTOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> . 47	
TABELA 7 - RESULTADO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO DOS AJUSTES DAS EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS. ....	49
TABELA 8 - COEFICIENTES E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS FORNECIDOS PELO <i>NEUROFOREST</i> 3.0 PARA SELEÇÃO DA MELHOR REDE. ....	51
TABELA 9 - ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE PARA A MODELAGEM DO VOLUME DE ÁRVORES DE <i>Araucaria angustifolia</i> , REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA) E A EQUAÇÃO DE SCHUMACHER-HALL. ....	51
TABELA 10 ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO CORRESPONDENTES ÀS REDUÇÕES AMOSTRAIS NA MODELAGEM DO VOLUME EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO SOLO (DAP) E ALTURA TOTAL DE ÁRVORE DE <i>Araucaria angustifolia</i> , UTILIZANDO O MELHOR MODELO DE REGRESSÃO E A MELHOR RNA. ....	53



## SUMÁRIO

<b>1 CAPÍTULO I: ASPECTOS GERAIS</b> .....	<b>11</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	11
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	12
1.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13
<b>2 CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 REVISAO DE LITERATURA .....	14
2.1.1 Araucaria angustifolia.....	14
2.1.2 Redes Neurais Artificiais .....	17
2.2 REFERÊNCIAS.....	19
<b>3 CAPÍTULO III: REDES NEURAI NA MODELAGEM HIPSOMÉTRICA EM POVOAMENTOS DE Araucaria angustifolia (Bertol.) O. Kuntze</b> .....	<b>23</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	23
3.2 OBJETIVOS .....	25
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.3.1 Caracterização da Área de Estudo .....	26
3.3.2 Coleta dos Dados.....	26
3.3.3 Processamento dos Dados .....	26
3.3.5 Modelagem hipsométrica por RNA .....	30
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.4.1 Relação Hipsométrica .....	33
3.4.2 Rede Neural Artificial .....	34
3.4.3 Rede Neural Artificial X Equação Hipsométrica .....	35
3.4.4 Redução da Intensidade Amostral .....	37
3.5 CONCLUSÃO.....	40
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

<b>4 CAPÍTULO IV: REDES NEURAS NA MODELAGEM VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTOS DE Araucaria angustifolia (Bertol.) O. Kuntze .....</b>	<b>43</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	43
3.2 OBJETIVOS .....	45
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.3.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	46
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
3.4.1 Rede Neural Artificial .....	50
3.4.2 Rede Neural Artificial X Equação Volumétrica .....	51
3.4.3 Redução da Intensidade Amostral .....	52
3.5 CONCLUSÃO.....	54
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>

# 1 CAPÍTULO I: ASPECTOS GERAIS

## 1.1 INTRODUÇÃO

A madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze, por possuir valor e qualidade elevada, foi a conífera mais explorada no Brasil pelas indústrias de base florestal (serraria, laminação, entre outros). Contudo, com a demanda crescente por produtos florestais, uma legislação mais restritiva ao corte em virtude do uso predatório da madeira, poucas pesquisas científicas sobre crescimento, produção, estoque, colheita, manejo e vários erros cometidos na fase de implantação dos antigos povoamentos de Araucária ocasionou uma substituição por gêneros exóticos como Pinus e Eucalyptus, principalmente (AQUINO, 2005).

A utilização da madeira de Araucária é polêmica e a falta de interesse por parte dos produtores faz com que essa espécie seja de baixo interesse científico. Entretanto, a Araucária é fornecedora de uma variedade de produtos e como o foco do manejo florestal sustentável é o de fornecer produtos madeireiros de qualidade de uma maneira eficiente por meio de prognose e estimativa das características das árvores e da área na qual estão inseridas faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas com Araucária (CURTO, 2015).

Cada tipo de povoamento florestal exige um manejo específico, uma vez que cada espécie responde diferentemente na recuperação do crescimento frente aos diferentes tratamentos silviculturais aplicados, como por exemplo o desbaste (PLAUBORG, 2004).

Vários métodos são utilizados para estimar as características quantitativas atuais e futuras em povoamentos florestais, entretanto a técnica ligada a Inteligência Computacional denominada Redes Neurais Artificiais (RNA) as quais são modelos matemáticos simplificados dos neurônios biológicos que processam as informações recebidas, ponderadas por pesos sinápticos, fornecendo uma única resposta tem gerado resultados satisfatórios em relação a outras técnicas como os modelos tradicionais de regressão (BINOTI, 2012).

As RNAs são uma alternativa promissora em relação a regressão para estimativa de diversos fatores como, por exemplo: possibilidade de modelagem com

variáveis categóricas e numéricas, modelagem de variáveis e suas relações não-lineares (LEITE, 2002).

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura do trabalho está organizada em cinco capítulos. O capítulo 1 e 2 tratam dos aspectos gerais do trabalho. O capítulo 3 foi uma comparação entre as RNAs e os modelos tradicionais de regressão para estimativa de altura das árvores. Neste mesmo capítulo foram simuladas diminuições na intensidade amostral e posterior validação tanto para as redes como para a regressão com o intuito de reduzir o número de árvores mensuradas em campo. No capítulo 4 foi feita uma comparação das redes com os modelos tradicionais de estimação de volume, além de uma redução na intensidade amostral das árvores com o intuito de diminuir o número de árvores a serem cubadas em campo. O capítulo 5 engloba as considerações finais.

O trabalho é composto pelos seguintes capítulos:

1 CAPÍTULO I: ASPECTOS GERAIS

2 CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3 CAPÍTULO III: REDES NEURAS NA MODELAGEM HIPSOMÉTRICA EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze

4 CAPÍTULO IV: REDES NEURAS NA MODELAGEM VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze

CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 1.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, F. M. Cultivo de *Araucaria angustifolia*: análise de viabilidade econômico-financeira. **Florianópolis: BRDE, 53p. 2005.**

BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de Redes Neurais Artificiais em mensuração e manejo florestal.** 130 f. (Doutorado em Mensuração Florestal) – Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2012.

CURTO, R. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 251f. (Doutorado em Manejo Florestal) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

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

PLAUBORG, K. U. Analysis of radial growth responses to changes in stand density for four tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 188, p. 65-75, 2004.

## 2 CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 REVISAO DE LITERATURA

#### 2.1.1 *Araucaria angustifolia*

- Características biológicas

*A. angustifolia* popularmente conhecida como pinheiro-brasileiro, pinheiro-do-paraná ou pinho é uma conífera da família da Araucariaceae. Essa família é caracterizada por árvores de grande porte e com trinta e três espécies, subdivididas em três gêneros: *Araucaria*, *Agathis* e *Wollemia* (OLIVEIRA, 2007).

A Araucária é uma planta dioica com raras exceções monoica (doenças, por exemplo) apresentando estruturas reprodutoras organizadas em estróbilos femininos e masculinos. A polinização ocorre principalmente pelo vento. A dispersão pode ser zoocórica, por aves e roedores, mas na maioria da vezes é apenas por autocoria, sendo a distância da árvore-mãe limitada, devido ao peso das sementes (CURTO, 2015).

A ocorrência de *A. angustifolia* se estende desde o estado do Rio Grande do Sul até Minas Gerais ocorrendo geralmente em agrupamentos próximos de homogêneos que dominam o dossel superior com alturas variando entre 20 e 30 metros, casca de aproximadamente 15 cm de largura e tronco entre 90 e 180 cm de diâmetro. As flores masculinas florescem nos meses de setembro a outubro e a maturação das sementes ocorre nos meses de abril a maio. A primeira floração pode ocorrer antes dos 20 anos em populações naturais ou antes dos 15 anos em plantios. O sistema radicular é caracterizado por raiz pivotante bem desenvolvida e raízes finas próximas à superfície (LORENZI, 1992; SANTOS, 2005; AQUINO, 2005).

A distribuição geográfica de *A. Angustifolia* está fortemente relacionada a um clima subtropical mesotérmico superúmido ou úmido, com verões amenos e invernos frios, precipitação bem distribuída e em grande quantidade ao longo do ano. Na área setentrional da sua distribuição o regime de precipitação também é estacional com seca no inverno variando de fraca a moderada (CARVALHO, 2003). Um fator relevante da distribuição da araucária são as condições térmicas (CURTO, 2015).

A araucária tem a capacidade de se estabelecer sob diferentes tipos de solos, desde solos com baixa fertilidade até em Latossolos Vermelhos, com alta fertilidade. No entanto, a produtividade maior ocorre em áreas que tem o Horizonte A bem desenvolvido, porosos, alta saturação de bases, textura franca a argilosa, bem drenados e com boa capacidade de retenção de água (FUPEF, 1978).

*A. angustifolia* é uma espécie florestal nativa do Sul do Brasil, integrante do Bioma Mata Atlântica, de grande importância ecológica, paisagística e com diversas utilidades econômicas como laminação, construção civil, celulose de fibra longa, molduras e forros (SANQUETTA, 2014; LORENZI, 1992). A madeira de araucária é leve e com retratibilidade média, apresenta boas características físicas e mecânicas em relação a densidade básica e traqueoides longos o que garante ótima qualidade dos produtos feitos com o seu material (OLIVEIRA, 2007).

- Exploração econômica

Originalmente as áreas de *A. Angustifolia* ocupavam aproximadamente um total de 7,5 milhões de hectares, no entanto, com o uso indiscriminado da madeira pelas indústrias ocorreu uma diminuição e posterior extinção em grandes áreas (LOUREIRO, 2013; HESS *et al.*, 2009). No Paraná, a exploração mais intensiva aconteceu durante a construção da estrada de ferro no século XIX, a qual objetivava o desenvolvimento da região, por meio de uma ligação do litoral ao primeiro planalto (FUPEF, 1978).

Os primeiros plantios no Brasil se iniciaram na década de 20 e atingiram o auge na década de 60 por meio dos incentivos fiscais. Especificamente no estado do Paraná os plantios tiveram início na década de 40 com o Instituto Nacional do Pinho e a Klabin Celulose e Papel S/A. Até a década de 80 *A. angustifolia* assumia posição de destaque dentre as espécies produtoras de madeira de lei, sendo a essência mais plantada dentro do programa de obrigatoriedade legal de reposição de espécies nativas mas, devido à complexidade para o manejo silvicultural, a maioria dos povoamentos não apresentaram o desenvolvimento esperado (INOUE *et al.*, 1979).

A partir da década de 80 o plantio de Araucária sofreu um declínio ligado diretamente com a alta exigência da espécie por solos produtivos e profundos e um desenvolvimento pequeno em relação ao esperado para a espécie gerado por erros

cometidos na implantação e no manejo. Um outro fator relevante foi a substituição por gêneros exóticos como *Pinus* e *Eucalyptus*, os quais são menos exigentes em fatores edáficos e com rotação mais curta (DIETRICH, 1979; SANTOS, 2006).

- Situação atual

O Bioma Mata Atlântica é o conjunto de fisionomias e formações florestais que possui maior biodiversidade do planeta, cobrindo originalmente uma área total de 15% do território nacional. Com o uso exploratório desse Bioma restam nos dias atuais apenas 7% da cobertura original, ou seja, 200 mil km<sup>2</sup>. A preocupação com o Bioma resultou depois de muita discussão a aprovação em 2006 da Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006), no qual as seguintes formações florestais nativas e ecossistemas associados fazem parte: Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Mista, também denominada de Mata de Araucárias; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Semidecidual; e Floresta Estacional Decidual, bem como os manguezais, as vegetações de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste (DECRETO nº 11.428, 2006).

Os remanescentes de Floresta Ombrófila Mista, na qual a Araucária é uma das espécies predominantes totalizam menos de 6% da superfície original, sendo raras as manchas com estrutura primitiva (KOCH, 2002). Por isso, o objetivo da Lei da Mata Atlântica foi a regulamentação de regras gerais e mais restritivas para exploração da Araucária. As vegetações primárias, secundárias em estágio médio e avançado de regeneração são proibidas de corte se não entrarem nos casos de utilidade pública, práticas preservacionistas e estudos de natureza científica (BASTOS, 2007).

Os fragmentos florestais em estágio médio de regeneração compostos por mais de 60% de árvores nativas em relação às demais espécies ali existentes, podem ser suprimidos, desde que respeitada a área de preservação permanente e a destinada à reserva legal. A vegetação secundária em estágio inicial de regeneração pode ser explorada desde que autorizada pelo órgão estadual competente. As normas a ela aplicadas serão as mesmas referentes à vegetação em estágio médio de regeneração na seguinte hipótese: quando o Estado possuir menos que 5% de



sua área original de Mata Atlântica nos estágios de vegetação primária e secundária (DECRETO nº 11.428, 2006).

No Paraná o corte pode ocorrer desde que a área com Araucária seja comprovadamente plantada (em linha e regulamentada no órgão competente); visto que as que se desenvolvem por regeneração natural são consideradas nativas e não podem ser cortadas ou manejadas (EMBRAPA, 2014). Com isso a importância do estudo em desenvolver projetos de manejo adequado para se ter um melhor aproveitamento da madeira que se insere na categoria permitida ao corte (SANTOS, 2006).

### 2.1.2 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) são um sistema computacional paralelo (camadas) constituído de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais) conectadas entre si de uma maneira específica para executar uma determinada tarefa (BINOTI, 2012). As RNA são compostas de uma camada de entrada, conexões, camadas intermediárias e uma camada de saída.

A rede neural é apresentada a diversos exemplos de um determinado problema, da qual extrai características durante o processo de aprendizagem, para posteriormente aplicar o conhecimento adquirido nos outros dados do mesmo tipo de problema (generalização) (SILVA, *et al.*, 2010)

As redes são organizadas em camadas que estão diretamente conectadas sendo elas: a) camada de entrada; b) camadas ocultas; c) camada de saída. Na camada de entrada os dados são inseridos à rede e ela se conecta com uma ou mais camadas ocultas onde ocorre o processamento por meio de um sistema de conexões ponderadas. A camada de saída apresenta o resultado do processamento (a variável desejada). O funcionamento da rede é determinado pela conexão entre as unidades de processamento, definida pelos pesos de cada ligação (SCHOENINGER *et al.*, 2008).

As redes vêm sendo estudadas em diferentes plantios florestais como um meio para substituição dos modelos tradicionais de regressão, as quais são afetadas por características do povoamento e variáveis ambientais como: idade, material genético, capacidade produtiva e características qualitativas (BINOTI, 2012). Essa

técnica vem sendo utilizada no setor florestal para aprimorar técnicas de biometria e inventário florestal permitindo maior acurácia na estimativa da produção e como consequência dar maior suporte à tomada de decisão (GÖRGENS *et al.*, 2005; BINOTI, *et al.*, 2009).

As redes proporcionam capacidade de aprendizado e generalização, possibilidade de considerar variáveis categóricas na modelagem, superioridade em relação às estimativas de modelos de regressão, capacidade de modelar diversas variáveis e suas relações não-linear, software gratuito específico para o setor florestal, tolerância a falhas devido ao elevado número de conexões entre os neurônios artificiais, tolerância a ruídos nos dados como *outliers* ou dados viesados (BINOTI, *et al.*, 2013; LEITE, *et al.*, 2011; BINOTI, 2010; DIAMANTOPOULOU, 2005).

As áreas com resultados comprovados são: cubagem, equações volumétricas (SILVA *et al.*, 2014; GÖRGENS, *et al.*, 2009), redução de custo (BINOTI, 2012), distribuição diamétrica, modelos hipsométricos (BINOTI, 2013), modelos de distribuição diamétrica, modelos de afilamento (*taper*), modelos em nível de árvore, previsão de preços e modelos de crescimento e produção em nível de povoamento (BINOTI, 2012; LEITE *et al.*, 2011).

Um dos grandes desafios das redes neurais é determinar o número de camadas, número de neurônios por camada e o tipo de conexão, ou seja, a arquitetura e a topologia para uma determinada aplicação (BINOTI, 2014).. De acordo com Diamantopoulou (2012) essas informações são obtidas testando-se diferentes configurações até que se atinja um nível de erro satisfatório.

O software gratuito específico para o setor florestal foi desenvolvido inicialmente em 2010 com o intuito de treinar e aplicar as redes para os mais diversos problemas do setor florestal (BINOTI, 2012). Entretanto, é fundamental uma cooperação entre profissionais do setor florestal e da área de informática para que o desenvolvimento dessa técnica ganhe maior dimensão e qualidade.

## 2.2 REFERÊNCIAS

AQUINO, F. M. **Cultivo de *Araucaria angustifolia***: análise de viabilidade econômico-financeira. Florianópolis: BRDE, 53 p. 2005.

BASTOS, N. Z. L. Considerações sobre a lei da Mata Atlântica (Lei 11.428/2006). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2007/relatorios/dir/relatorio\\_natasha\\_zadorosny.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2007/relatorios/dir/relatorio_natasha_zadorosny.pdf)>. Acesso em: 07/06/2015.

BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de Redes Neurais Artificiais em mensuração e manejo florestal**. 130f. (Doutorado em Mensuração Florestal) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 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, v. 37, n. 4, 2013.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. L.; ANDRADE, V. C. L.; FERREIRA, M. C.; SILVA, A. A. L. Emprego de Redes Neurais Artificiais para estimar volume de árvores de Eucalipto. **Atualidades em Mensuração Florestal**. 2014, p. 327 – 331.

BRASIL. Decreto-lei n. 11.428 de 22 de dezembro de 2006. Diário Oficial [da] da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2006.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas – 4. ed.atual.ampl.** – Viçosa; MG: ED. UFV, 2013.

CUNHA, U. S. Dendrometria e Inventário Florestal. 2004 Disponível em: <[http://engenhariaflorestal.jatai.ufg.br/uploads/284/original\\_dendroinv.pdf](http://engenhariaflorestal.jatai.ufg.br/uploads/284/original_dendroinv.pdf)>. Acesso: 28/09/2015.

CURTO, R. A. **Avaliação do Crescimento e potencial de manejo em plantio superstocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 251 f. (Doutorado em Manejo Florestal) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

DIAMANTOPOULOU, M. J. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. **Computers and electronics in agriculture**, v.10, n.3, p.235-244, 2005.

DIETRICH, A. B. **Relações entre dados analíticos do solo: análise foliar e dados de crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Programa de Melhoramento genético de Araucária da Embrapa Florestas: situação atual e perspectivas. Colombo PR. 40f. 2012. Disponível em:

<<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/67269/1/Doc.-237.pdf>>. Acesso em: 28/09/2015

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; JÚNIOR, J. A. S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson. **Revista Política Hoje**, v. 18, n.1, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; FELDE, J. L.; DIAS, A. N. Dynamic of stem taper and wood production in *Araucaria angustifolia* plantations. **CERNE**. Lavras. v.20, n. 4, p. 595 – 603, 2014.

FUPEF – Fundação de Pesquisas florestais do Paraná. **Inventário florestal do pinheiro no sul do Brasil**: relatório final. Curitiba, FUPEF/IBDF, 1978. 199 f.

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.

HESS, A. F.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em função da idade, em três regiões do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 7-22, 2009.

HRADETZKY, J. **Analysis und interpretation statistisher abränger keiten (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)**. Baden – Württemberg Mitteilungen der FVA, Helf 76, 1976. 146 p. (Abt.Biometric und Informatik, 21).

INOUE, M. T.; GALVÃO, F.; TORRES, D. V. Estudo ecofisiológico sobre *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze: Fotossíntese em dependência à luz no estágio juvenil. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 10, n.1, p. 5-9, 1979.

KOCH, Z. **Araucaria a Floresta do Brasil Meridional**. Olhar Brasileiro, Curitiba. 2002. 148 f.

KOEHLER, A. B.; CORAIOLA, M.; NETTO, S. P. Crescimento, tendências de distribuição das variáveis biométricas e relação hipsométrica em plantios jovens de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Ktze., em Tijucas do Sul, PR. **Scientia Forestalis**., Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 53-62, mar. 2010.

LANSSANOVA, L. R.; UBIALLI, J. A.; ARCE, J. E.; PELISSARI A. L.; FAVALESSA, C. M. C.; LEITE, H. G.; GAMA, J. R. V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (roll.) warb1. **Revista Árvore**, v. 30, n.1, p. 99-106, 2006.

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. 1 p. 321-328, 2002.

LEITE, H. G.; SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F. H. 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.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. São Paulo: Plantarum, 1992. 368 p.

LOUREIRO, G. H. **Diagrama de Manejo da Densidade para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2013.

MACHADO, S. A. FILHO, A. F. **Dendrometria**. 2ª edição – Guarapuava: UNICENTRO, 2009.

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZICK, A. L. D. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no Capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 56, p.5-16, jan-jun/2008.

OLIVEIRA, J. M. **Anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze: bases de dendroecologia em ecossistemas subtropicais montanos no Brasil**. 139 f. (Doutorado em Ecologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PEREIRA, J. E. S.; ANSUJ, A. P.; MÜLLER, I.; AMADOR, J. P. Modelagem do volume do tronco do *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maridem. In: Simpósio De Engenharia de Produção, 12., 2005, Bauru. **Anais**. Bauru: SIMPEP, 2005.

R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; ROGLIN, A.; PIMENTEL, A. Relações diâmetro-altura para espécies lenhosas em um fragmento de floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. **IHERINGIA**, Sér. Bot., Porto Alegre, v. 68, n. 1, p. 103-114, junho 2013.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Trop.**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; DALLA CORTE, A. P.; FERNANDES, L. A. V.; SIQUEIRA, J. P. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. 2ª edição Revista Ampliada. 2009. 270 p.

SANTOS, W. C. **Análise de características dendrométricas e fatores edáficos no crescimento e produção de um povoamento de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. C.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. **Ambiência**. v. 4(3): p. 529-549, 2008.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber, 2010.

SILVA, P. V.; ARAÚJO, A. C. S. C.; MARTINS, E. R.,; BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Estimação do Volume de Árvores de Eucalipto Utilizando Redes Neurais Artificiais, 2014, Curitiba, **Atualidades em Mensuração Florestal**. 2014. p. 84 – 87.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. – 4. Ed. Rev. Atual. – Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; JUNIOR, H. U. L.; SILVA, G. F.; FIGUEIREDO, L. T. M. Equações hipsométricas, volumétricas e de *taper* para onze espécies nativas1. **Revista Árvore**, v. 35, p. 1039-1051, 2011.

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

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

URBANO, E. **Quantificação da estimativa da biomassa aérea e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba**. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2007.

### 3 CAPÍTULO III: REDES NEURAIAS NA MODELAGEM HIPSOMÉTRICA EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A predição ou projeção do crescimento e da produção é um dos principais componentes do manejo florestal, juntamente com a classificação de terras e com as prescrições silviculturais (CAMPOS e LEITE, 2013). A altura das árvores é uma variável de extrema importância pois é componente dos modelos volumétricos mais usados, além de ser a variável mais utilizada na classificação dos sítios, no caso, a altura das árvores dominantes e codominantes.

Os instrumentos de medição de altura tiveram uma importante evolução com o decorrer do tempo como o aumento da precisão e acurácia, por exemplo. No entanto, a aferição da altura ainda tem o inconveniente de ser mais suscetível a erros em comparação com a medição do dap, pois pode ser inviabilizada por condições meteorológicas como chuva e ventos fortes, tempo necessário para concluir as medições e a falta de visibilidade do topo da árvore pelo operador em povoamentos muito densos (MACHADO, 2009; CAMPOS e LEITE, 2009).

Portanto, ao contrário do dap medido em todas as árvores da unidade amostral são medidas, somente uma pequena parcela das alturas o são, sendo a altura do restante das árvores estimada. A precisão e exatidão dessas estimativas têm, pois, grande efeito na classificação do sítio e na predição (ou projeção) da produção.

As coníferas apresentam na maioria das vezes fustes bem definidos, o que facilita a identificação as diferentes alturas como: altura total, comercial, do fuste, do toco, entre outros. Estas são, então, determinadas através de medidas diretas, indiretas e estimativas. Quando essa medida é realizada indiretamente a sua construção é baseada no princípio trigonométrico, o qual é fundamentado em relações angulares de triângulos retângulos ou no princípio geométrico, fundamentado nas relações entre lados de triângulos semelhantes (MACHADO E FILHO, 2009).

As relações hipsométricas são uma relação natural entre  $DAP_{c/c}$  e a altura total, também denominadas de relação h/d e tem a importância de reduzir os custos

de medição (CAMPOS e LEITE, 2009). A relação hipsométrica além de ser uma relação frágil tem a desvantagem de ser afetada por algumas características do povoamento e do ambiente como: posição sociológica (dominantes, dominadas), densidade, comprimento de copa, idade, material genético, características qualitativas e sítio. A inclusão dessas características é possível mas pode resultar em uma maior complexidade de modelagem (BINOTI, 2010).

Essas estimativas são tradicionalmente feitas com modelos de regressão linear e não-linear. Existe uma grande quantidade de modelos de regressão que foram desenvolvidos e aplicados com sucesso para este fim (CAMPOS e LEITE, 2013). Entretanto, uma ferramenta já conhecida e utilizada em outras áreas do conhecimento, as redes neurais artificiais (RNAs), vêm sendo aplicada nos últimos tempos com sucesso na modelagem florestal (BINOTI, 2012).

As RNAs são sistemas computacionais paralelos (camadas), constituídos de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais) conectadas entre si de uma maneira específica para executar uma determinada tarefa (BINOTI, 2012). Os neurônios, por sua vez, são modelos matemáticos inspirados no funcionamento dos neurônios biológicos, que processam as informações recebidas, ponderam-nas por pesos sinápticos e fornecem uma ou mais respostas (HAYKIN, 2001; BRAGA *et al.*, 2007).

Trabalhos que comprovaram a eficiência das RNAs na modelagem florestal foram e vem sendo desenvolvidos, alguns como modelagem da altura (BINOTI *et al.*, 2012), volume e afilamento (SCHIKOWSKI *et al.*, 2015; BINOTI *et al.*, 2014; GÖRGENS *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2009), distribuição diamétrica (BINOTI *et al.*, 2012b), entre outros. A maioria destes trabalhos foi desenvolvido em povoamentos de *Eucalyptus*, mas as RNAs já foram abordadas em outras espécies como Teca (SILVA, 2008) e na modelagem de florestas nativas (SCHOENINGER *et al.*, 2008). Além disso, as RNAs, são uma alternativa na diminuição da amostragem dada a capacidade de aprendizado de informações recebidas de um conjunto de dados e a posterior generalização desse aprendizado para dados desconhecidos (SCHIKOWSKI *et al.*, 2015).



### 3.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi testar as redes neurais artificiais (RNA) para a estimativa da altura total ( $h_t$ ) de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze em função do diâmetro a 1,30 m do solo (dap) e comparar o seu desempenho com o de equações hipsométricas. Também foi alvo deste trabalho avaliar a sensibilidade da técnica acima descrita, em função da redução na intensidade amostral do conjunto de pares de valores de  $h_t$  e dap.

### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.3.1 Caracterização da Área de Estudo

O inventário foi realizado em plantios de *A. angustifolia* localizados na região oeste do Estado do Paraná, no município de Quedas do Iguaçu. Nesta foram mensuradas 98 parcelas temporárias de 600 m<sup>2</sup> cada em floresta plantada com *A. angustifolia* com idades variando entre 16 e 32 anos, sem desbaste.

#### 3.3.2 Coleta dos Dados

Em 2004, noventa e oito parcelas circulares foram distribuídas nos povoamentos de forma sistemática dentro das quais mediram-se os diâmetros a 1,30 m da superfície do solo (dap) de 30.705 árvores. Deste total, foram medidas as alturas totais ( $h_t$ ) de 6.936 árvores, as quais foram utilizadas para a modelagem da altura total em função do dap.

#### 3.3.3 Processamento dos Dados

Três etapas foram seguidas no processamento: seleção do melhor modelo de regressão; seleção da melhor RNA; comparação entre o melhor modelo de regressão e a melhor RNA.

A primeira e a segunda etapa foram procedidas com 100% da base de dados, ou seja, com as 6.936 árvores com pares de dados  $h_t$ -dap. Na terceira etapa, as comparações foram feitas primeiramente entre o melhor modelo e a melhor RNA com base nos 100% dos dados. Não houve validação nesta etapa bem como nas anteriores. As comparações foram procedidas com base nas estatísticas e gráficos provenientes dos ajustes (regressões) e treinamentos (RNA's).

Posteriormente, amostraram-se aleatoriamente 50%, 25% e 10% das árvores. O melhor modelo ajustado e a melhor RNA treinada nas reamostragens foram validados (aplicados) no restante da base de dados (i.e. 50%, 75% e 90%, respectivamente), conforme

FIGURA 1. Aqui, as comparações foram procedidas com base nas estatísticas e gráficos provenientes das validações.

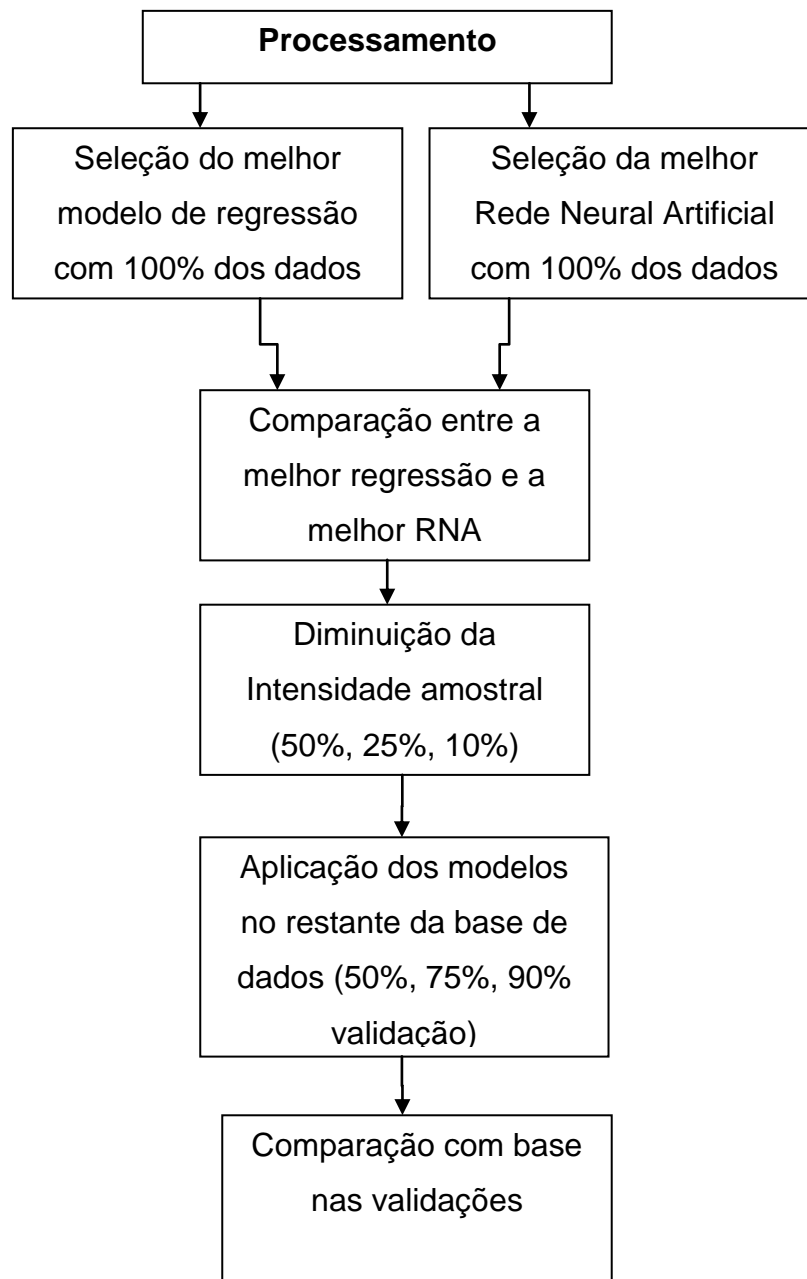


FIGURA 1 – PROCEDIMENTO REALIZADO PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL EM POVOAMENTO DE *A. Angustifolia*

FONTE: O Autor (2015)

### 3.3.4 Modelagem hipsométrica por regressão

Seis modelos foram testados dentre os quais cinco lineares e um não linear (TABELA 1). Dois dos modelos lineares são originalmente não-lineares mas podem ser facilmente logaritmizados para linearização e são comumente usados desta

forma. Os modelos foram retirados da literatura com enfoque em relações hipsométricas com *Araucaria angustifolia* (CALDEIRA *et al.*, 2003; MACHADO *et al.*, 2008; KOEHLER, 2009; KOEHLER, 2010) e de livros de mensuração florestal (CAMPOS, 2013; SANQUETTA, 2006).

Após o ajuste destes modelos, na retransformação da variável resposta, ou seja, ao se aplicar o exponencial da mesma, é necessária a correção da discrepância logarítmica (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2003; CALDEIRA *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2006; KOEHLER, 2009; SANQUETTA *et al.*, 2014). Esta correção é feita pela multiplicação do exponencial da variável resposta pelo fator de Meyer (URBANO, 2007; MACHADO *et al.*, 2008).

TABELA 1: MODELOS DE REGRESSÕES TESTADAS PARA ESTIMAR ALTURA TOTAL EM FUNÇÃO DO DAP EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia*.

Equação	Modelo	Número
$ht = \beta_0 + \beta_1 \ln * dap + \varepsilon$	Henricksen	1
$ht = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2 + \varepsilon$	Parabólico	2
$ht = \beta_0 + \beta_1.1/dap^2 + \varepsilon$	S/D	3
$\ln ht = \beta_0 + \beta_1.1/dap + \varepsilon$	Curtis	4
$\ln ht = \beta_0 + \beta_1 \ln dap + \varepsilon$	Stoffels	5
$ht = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 dap})^{\beta_2} + \varepsilon$	Chapmann & Richards	6

Nota:  $h_t$  é a altura total das árvores individuais (m);  $dap$  é o diâmetro à 1,30 m do solo (cm);  $\beta$ 's são os coeficientes a serem estimados;  $\varepsilon$  é o erro estatístico com distribuição normal, média zero e variância constante;  $\ln$  é o logaritmo natural; "S/D" – sem denominação.

FONTE: O Autor (2015)

As equações lineares e não lineares foram ajustadas nos programas Excel e R, respectivamente. Os métodos de ajuste das regressões foram o método dos mínimos quadrados ordinários para os modelos lineares e Levenberg-Marquart para o não-linear.

Para avaliar a precisão e qualidade do ajuste das funções hipsométricas, foram utilizadas as estatísticas erro padrão de estimativa em percentagem ( $S_{yx}\%$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) e a correlação de Pearson ( $r_{HH}$ ) entre os valores observados e estimados. Além dessas estatísticas, foram analisados gráficos de dispersão de resíduos em função da variável DAP. Caracteriza-se como melhor modelo aquele que apresentar o menor  $S_{yx}\%$ , os maiores valores de  $R^2_{aj}$  e

$r_{H\hat{H}}$ , e gráficos de resíduos mais próximos e homogeneamente distribuídos ao redor da linha 0. Abaixo segue uma breve descrição das estatísticas e a forma como foram calculadas.

$$\text{Resíduo\%} = \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Em que:

$y_i$ =valores observados;

$\hat{y}_i$ =valores estimados.

O erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{yx}\%$ ) mostra o quanto o modelo ajustado erra em média, em termos relativos, ao estimar a variável dependente.

$$S_{yx\%} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}}{\bar{y}} \quad (2)$$

Em que:

$y_i$ =valores observados;

$\hat{y}_i$ =valores estimados;

$\bar{y}$ =valor médio dos valores observados;

$n$  = número de coeficientes do modelo;

$p$  = número de observações.

A correlação de Pearson ( $r$ ) mensura a direção e o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, ou seja, ela é uma medida da variância compartilhada entre duas variáveis. O coeficiente varia de +1 a -1 sendo que o sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou +1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra (FIGUEIREDO FILHO, 2009).

$$r_{HH} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (3)$$

Em que:

$E_i$ =valores estimados;

$\bar{E}$ =média dos valores observados;

$O_i$ =valores estimados;

$\bar{O}$ =média dos valores observados.

Para o cálculo do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) utilizou-se a seguinte expressão matemática:

$$R^2_{ajustado} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) \cdot \left( \frac{SQ_{resíduos}}{SQ_{totais}} \right) \quad (4)$$

Em que:

$n$  = Número de dados observados;

$p$  = Número de coeficientes do modelo;

$SQ_{resíduos}$  = Soma dos quadrados dos resíduos;

$SQ_{totais}$  = Soma dos quadrados totais.

### 3.3.5 Modelagem hipsométrica por RNA

As redes neurais foram testadas utilizando o Programa *NeuroForest* versão 3.3 desenvolvido pelo professor Dr Hélio Garcia Leite da Universidade Federal de Viçosa, Dr Daniel Breda Binoti diretor de pesquisa e desenvolvimento da empresa DAP florestal e pela professora Dr Mayra Luiza Silva Marques Binoti da Universidade Federal do Espírito Santo e disponível gratuitamente pelo projeto *NeuroForest* (<http://NeuroForest.ucoz.com/>).

Para o treinamento foram utilizados o dap como variável de entrada e a altura total como variável de saída. As configurações de treinamento foram: tipo de RNA *Multilayer Perceptron* (MLP), algoritmo de treinamento *Resilient Propagation*,

função de ativação tangente hiperbólica e até cinco camadas ocultas. O critério de parada foi quando o erro médio atingisse 0.0001 ou quando se chegasse a um número de 30.000 ciclos.

As redes foram comparadas pelas estatísticas *bias*, RQME e correlação de Pearson entre os valores observados e estimados.

O *bias* expressa o desvio médio dos valores estimados em relação aos observados e indica a tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores estimados. Quanto mais próximo a zero a estimativa, menor é a magnitude do erro sistemático (LEITE e ANDRADE, 2002). A expressão para o seu cálculo é:

$$\text{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (5)$$

Em que:

$Y_i$  e  $\hat{Y}_i$  = valores observados e estimados;

n = número de casos.

A raiz quadrada do erro médio (RQEM) avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e estimados. Quanto menor o RQEM, melhor a precisão da estimativa, sendo ótimo quando é igual a zero.

$$\text{RQEM (\%)} = \frac{100}{\bar{H}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H})^2}{n}}$$

Em que:

$\bar{H}$  = média das alturas totais observadas

n = número total de observações

### 3.3.6 Critérios estatísticos adotados para a comparação do modelo hipsométrico com a RNA

Para comparação entre o melhor modelo ajustado e a melhor RNA as estatísticas utilizadas foram: a RQEM, o  $r_{H\hat{H}}$  entre altura observada e altura estimada, eficiência do modelo (EF), *bias*, gráfico de dispersão de resíduos em função do dap e gráfico de dispersão da altura estimada pela altura observada.

Para o cálculo da eficiência do modelo foi utilizada a mesma fórmula do coeficiente de determinação, mas é assim convencionalmente denominado quando aplicado à validação de modelos (PAULO *et al.*, 2011).



### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.4.1 Relação Hipsométrica

Dos modelos aqui ajustados, apenas um se diferenciou pela pior qualidade de ajuste, o modelo 3. Todas as outras estatísticas de qualidade de ajuste dos demais modelos (TABELA 2) estão na mesma faixa das encontradas em outros trabalhos com *Araucaria angustifolia* (CALDEIRA *et al.*, 2003; SANQUETTA *et al.*, 2014), visto que em relações hipsométricas é comum que o coeficiente de determinação ajustado não ultrapasse 80% uma vez que a correlação altura/diâmetro não é tão forte quanto à altura/volume (MACHADO *et al.*, 2008). O desempenho alto das equações hipsométricas para *A. angustifolia* também pode ser explicado pela morfometria estável que a espécie apresenta (SANQUETTA *et al.*, 2013).

A TABELA 2 inclui os coeficientes ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ), o erro padrão da estimativa absoluto e relativo ( $S_{yx}$ ), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), correlação de Pearson ( $r_{HH}$ ) e o fator de correção de Meyer (FCM).

TABELA 2: COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE PARA OS MODELOS HIPSONÔMTRICOS EM POVOAMENTOS DE *ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA*.

N	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$S_{yx\ rec}$	$S_{yx\ rec\ \%}$	$R^2_{aj}$	$r_{HH}$	FCM
1	-3,1739	6,1999		1,8735	13,35	0,7348	0,85	
2	2,2090	0,9825	-0,0155	1,8438	13,14	0,7431	0,86	
3	14,5247	-52,4563		3,1966	22,79	0,2281	0,47	
4	2,9215	-4,4401		2,0731	14,78	0,6860	0,83	1,0185
5	0,9389	0,5963		1,9471	13,88	0,7683	0,85	1,0136
6	20,4473	-0,0662	0,8940	1,8397	13,12	0,7488	0,86	

\*Todos os coeficientes das equações e as correlações de Pearson foram significativos a 5% de significância. FCM – Fator de correção de Meyer.

Fonte: O Autor (2015)

Na FIGURA 2 são apresentadas as distribuições dos resíduos das equações ajustadas para a *A. angustifolia*. Verificou-se uniformidade ao longo das classes de dap, com resíduos positivos e negativos balanceados e inexistência de tendências ou heterocedasticidade para a maioria das equações. A equação número 3 apresenta certa tendência de subestimar as alturas para as classes de dap até 10 cm. O melhor modelo selecionado foi o de Stoffels (5) por ser de mais fácil

processamento em comparação com o modelo não linear de Chapman e Richards, visto que tanto a equação de Stoffels quanto a de Chapman e Richards apresentaram uma dispersão e estatísticas de qualidade parecidas .

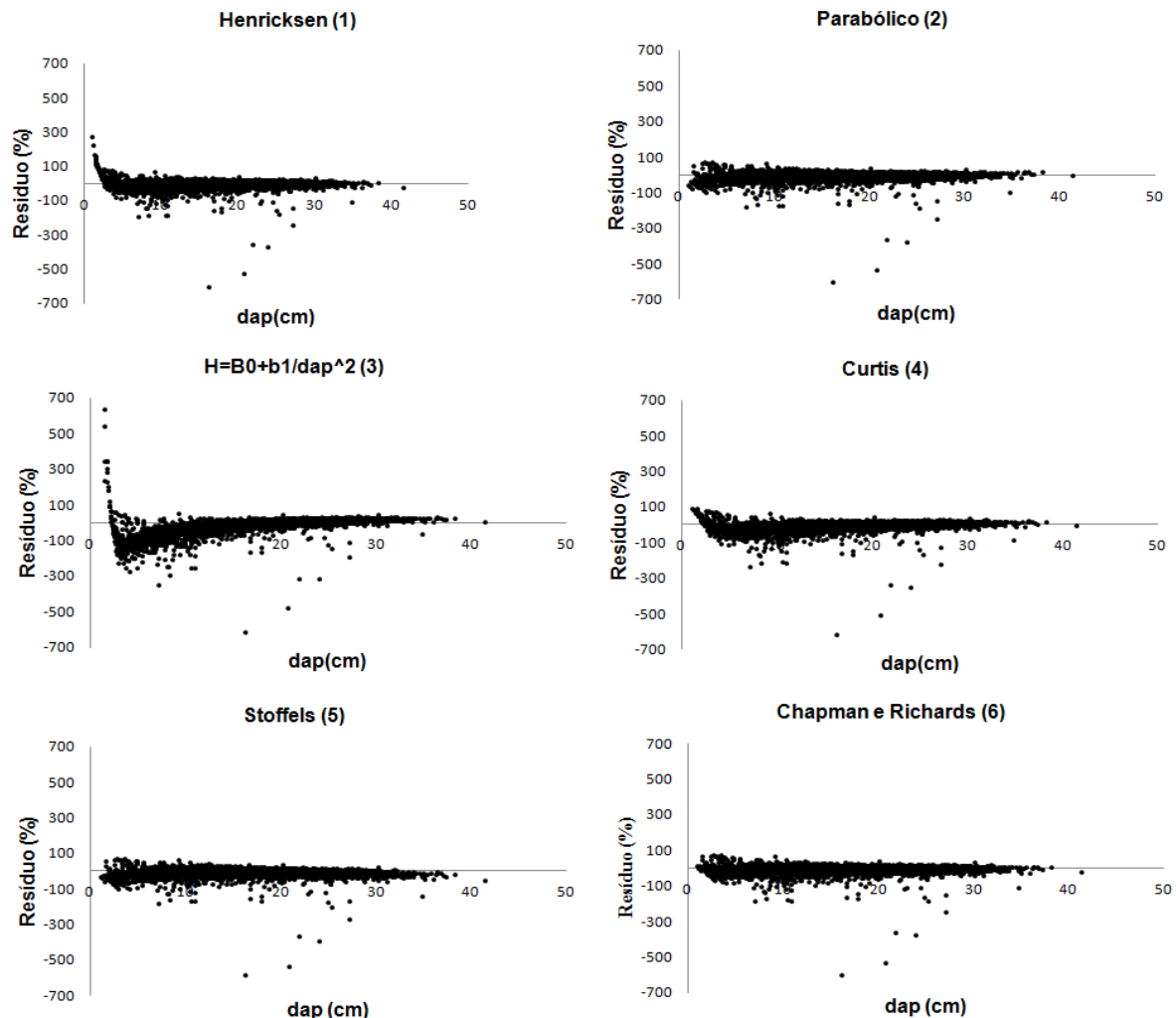


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÕES DOS RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO A 1,30 DO SOLO (DAP), PARA OS SEIS MODELOS AJUSTADOS PARA POVOAMENTOS PUROS EQUIÂNEOS DE *Araucaria angustifolia* NO SUL DO BRASIL.

FONTE: O Autor (2015)

### 3.4.2 Rede Neural Artificial

A melhor rede com base nos parâmetros gerados foi a RNA 1. Entretanto todas as cinco RNAs apresentaram boas estatísticas de qualidades de ajuste com valores próximos (TABELA 3). Foi utilizada a arquitetura MLP com uma camada de entrada (dap), cinco na camada oculta e um na camada de saída ( $h_t$ ). Foram

treinadas cinco redes sendo o tipo de treinamento *Resilient Propagation* e função de ativação tangente hiperbólica.

TABELA 3 - COEFICIENTES E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS FORNECIDOS PELO NEUROFOREST 3.0 PARA SELEÇÃO DA MELHOR REDE.

<b>RNA</b>	<b>Bias</b>	<b>RQME</b>	<b><math>r_{HH}</math></b>
<b>RNA 1</b>	13,6071	13,9418	0,8631
<b>RNA 2</b>	13,6071	13,9419	0,8630
<b>RNA 3</b>	13,6070	13,9417	0,8631
<b>RNA 4</b>	13,6073	13,9421	0,8631
<b>RNA 5</b>	13,6075	13,9422	0,8630

Fonte: *NeuroForest* versão 3.0

Fonte: O Autor (2015)

### 3.4.3 Rede Neural Artificial X Equação Hipsométrica

A RNA selecionada apresentou-se superior ao melhor modelo hipsométrico em relação a todas as estatísticas de qualidade de ajuste (TABELA 4), o que confirma, o achado em outros trabalhos, de que as RNAs são uma alternativa promissora na substituição de modelos tradicionais de regressão para modelagem florestal (BINOTI, 2012; CAMPOS e LEITE, 2013).

O modelo hipsométrico apresenta algumas dificuldades na inserção de muitas variáveis como a dificuldade de modelagem e quantificação das influências sobre a variável a ser estimada (altura total). Essas relações apresentam características não lineares ou valores categóricos, a exemplo do tipo de solo, podendo ser incluídas em regressões somente como variáveis binárias e ocasionar aumento na complexidade de modelagem. No entanto, as RNAs aceitam a inserção de informações como solo, clone, precipitação e radiação, entre outras, o que permite aumentar a precisão das estimativas (BINOTI, 2013).

A eficiência das redes para estimativa de altura também é observada em trabalhos com *Eucalyptus* (BINOTI, 2013). Binoti *et al.* (2012) validaram um modelo para estimar a altura de povoamentos equiâneos de eucalipto, visando redução dos custos do inventário florestal e concluíram que a utilização das RNAs permitiu reduzir o número de medições da variável altura, sem nenhum prejuízo a precisão requerida.

TABELA 4 - ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE PARA A MODELAGEM DA ALTURA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO SOLO (DAP) DE ÁRVORES DE *Araucaria angustifolia*, REDES NEURAIS ARTIFICIAS (RNA) E A EQUAÇÃO DE STOFFELS.

Modelo	RQME	$r_{HH}$	Bias	EM
RNA	13,94	0,8631	-0,00023	0,7449
Stoffels (5)	13,88	0,8513	-0,0688	0,7135

\*RQEM-Raíz quadrada do erro médio;  $r_{HH}$  correlação de Pearson entre as alturas observadas e estimadas; EM-eficiência do modelo.

Em relação à distribuição de resíduos, não constataram-se grandes diferenças entre as duas metodologias, apresentando, ambas, distribuição razoavelmente uniforme com e sem tendência aparente. Chama-se a atenção para alguns resíduos negativos extremos, mas que foram geradas por ambos procedimentos (FIGURA 3).

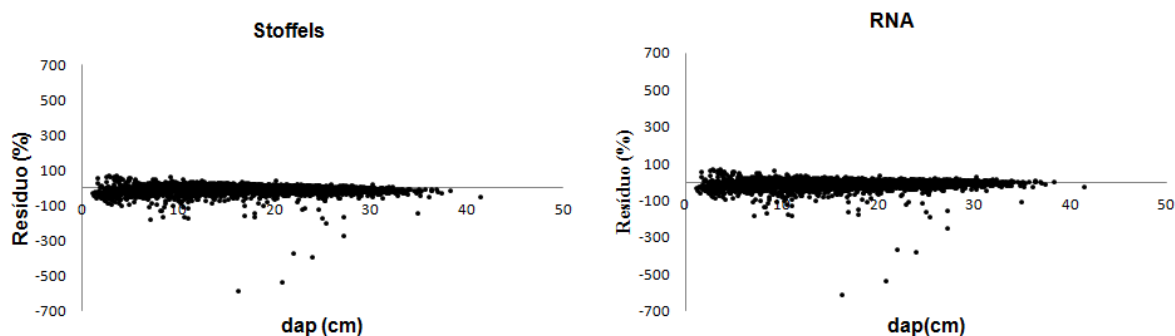


FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO PEITO (DAP), PARA A REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA) E A EQUAÇÃO DE STOFFELS.

Fonte: o Autor (2015)

Na FIGURA 4 são apresentadas as relações entre as distribuições da altura observada e estimada para Stoffels e RNA, reafirmando a semelhança no desempenho dos dois métodos de modelagem.

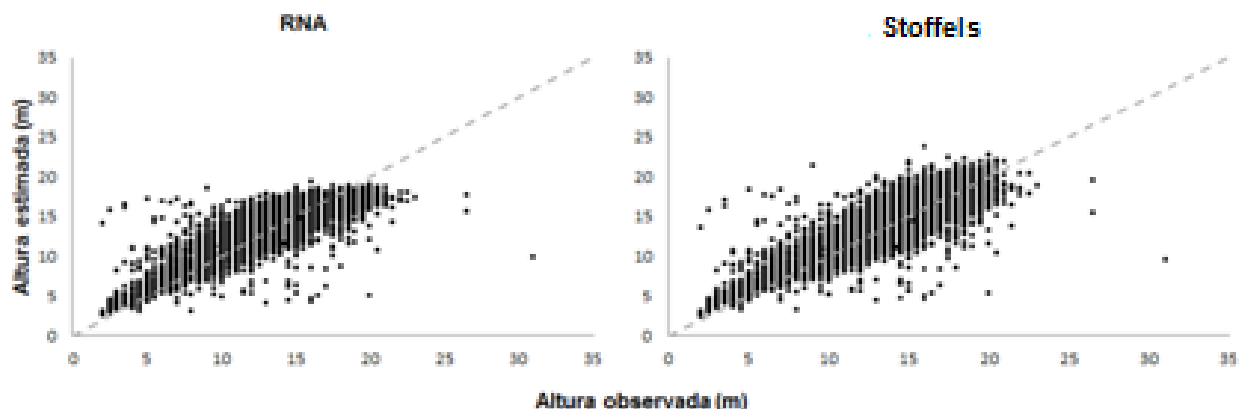


FIGURA 4 - ALTURAS TOTAIS OBSERVADAS E ESTIMADAS PARA *Araucaria angustifolia* UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E A EQUAÇÃO DE STOFFELS. A LINHA TRACEJADA, PARA FINS DE COMPARAÇÃO, REPRESENTA A RELAÇÃO 1:1, OU SEJA, A CORRESPONDÊNCIA PERFEITA ENTRE A ALTURA ESTIMADA E A OBSERVADA.

Fonte: O Autor (2015)

#### 3.4.4 Redução da Intensidade Amostral

Com a diminuição da amostragem tanto as RNAs quanto as equações mantiveram os valores das estatísticas. Assim como no uso de toda a base de dados, nas reamostragens as RNAs apresentaram-se ligeiramente superiores (TABELA 5). Essas estatísticas comprovam que com a utilização das RNA é possível diminuir a intensidade amostral sem prejuízo aos resultados finais. No caso deste trabalho uma redução de 50% seria a mensuração de 3468 árvores ao invés de 6936 (100%), por exemplo. A diminuição de árvores mensuradas gera menos custos e tempo com o inventário.

TABELA 5 - ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO CORRESPONDENTES ÀS REDUÇÕES AMOSTRAIS NA MODELAGEM DA ALTURA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO SOLO (DAP) DE ÁRVORE DE *ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA*, UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E A EQUAÇÃO DE STOFFELS.

Estatísticas	RNA				Modelo de Stoffels			
	Reamostragem (%)				Reamostragem (%)			
	100*	50	25	10	100*	50	25	10
<b>RQEM</b>	13,94	13,26	13,12	13,74	13,88	13,95	13,97	13,84
<b>Bias</b>	-0,0002	0,0664	-0,1076	0,0410	-0,0688	0,0146	-0,1536	0,0613
<b>EM</b>	0,7449	0,7506	0,7414	0,7437	0,7135	0,7266	0,7080	0,7126
$r_{HH}$	0,8631	0,8698	0,8599	0,8662	0,8513	0,8561	0,8496	0,8537

EM= eficiência do modelo ;  $r$  = correlação de Pearson entre valores observados e estimados; RQEM= raiz quadrada do erro médio; Reamostragem = percentagem da base de dados utilizada no ajuste/treino. Complementarmente a validação é procedida com 1 – a reamostragem.\*= quando 100% dos dados foram utilizados as estatísticas correspondem ao treino/validação.

Fonte: O Autor (2015)

Pelos gráficos de dispersão das validações (FIGURA 5) observa-se praticamente o mesmo padrão para os dois métodos de modelagem.

Este trabalho mostra, corroborando com outros autores (SCHIKOWSKI *et al.*, 2015; BINOTI, 2012; CAMPOS e LEITE, 2013), o potencial de uso das RNAs na modelagem da florestal. Muito embora tanto a equação de Stoffels quanto a RNA apresentaram resultados satisfatórios, a última sempre se apresentou superior.

As RNAs têm ainda a conveniência da inserção de variáveis explicativas tanto quantitativas quanto categóricas. Por exemplo, outras variáveis do povoamento podem ser inseridas como: idade das árvores, densidade do povoamento, índice de sítio, variáveis referentes ao material genético utilizado como procedência e família, variáveis ambientais como tipo de solo, precipitação, radiação solar, temperatura, além de variáveis do cadastro do inventário florestal.

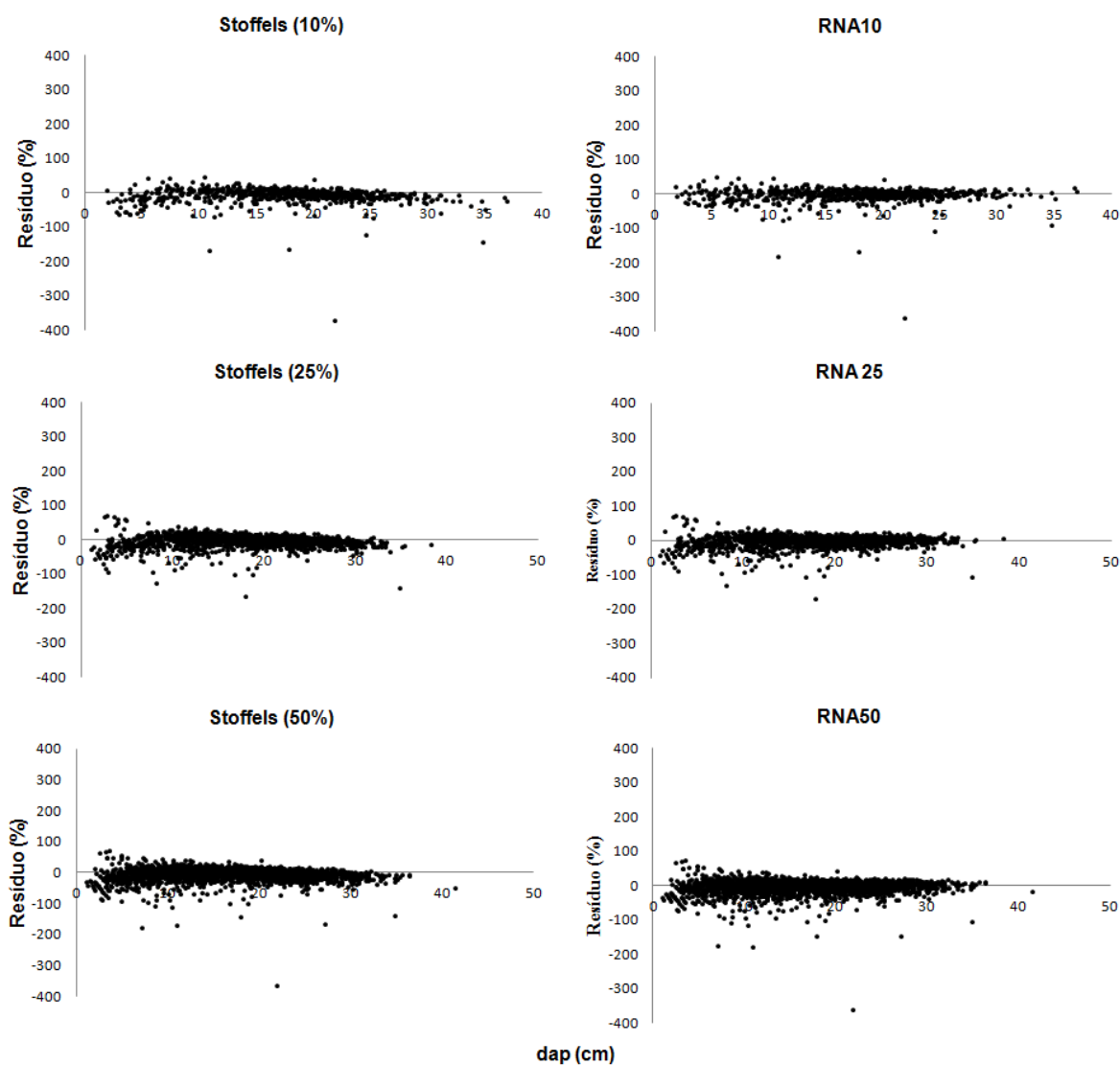


FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO PEITO (DAP), PARA VALIDAÇÃO DAS AMOSTRAGENS NAS REDES NEURAS E NA REGRESSÃO.

Fonte: O Autor (2015)

Uma única rede neural pode comportar todas essas variáveis, o que seria inviável de ser feito em um único modelo de regressão. Para esta, estratificações devem ser procedidas, resultando em um grande número de equações a serem armazenadas e aumentando a chance de erros de processamento.

Assim, as RNAs apresentam não somente vantagens numéricas, mas operacionais sobre os modelos tradicionais de regressão. Caracterizam-se, assim, como uma ferramenta promissora para os empreendimentos florestais.

### 3.5 CONCLUSÃO

Tanto as redes neurais artificiais quanto a equação de Stoffels obtiveram resultados satisfatórios na estimação da altura total em função do diâmetro a altura do peito (dap) de árvore de *A. angustifolia*. As redes neurais, no entanto, foram ligeiramente superiores tanto no uso de 100% da base de dados quanto na diminuição da amostragem.

As redes neurais podem ser empregadas de maneira eficiente e com vantagens sobre os modelos tradicionais de regressão para estimar altura em povoamentos de *A. angustifolia*.



### 3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de Redes Neurais Artificiais em mensuração e manejo florestal**. 130f. (Doutorado em Mensuração Florestal) – Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2012.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos utilizando redes neurais artificiais. **Agrária**, v.8, p.125-129, 2012.

BINOTI, M. L. S., BINOTI, D. H. B., LEITE, H. G. Aplicação de Redes Neurais Artificiais para estimação de altura em povoamentos equiâneos de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.4, p.639-645, 2013.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. L.; GARCIA, S. L. R.; FERREIRA, M. Z.; RODE, R.; SILVA, A. A. L. Redes Neurais Artificiais para estimação do volume de árvores. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, Mar/Abr., 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.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; SCHEEREN, L. W.; WATZLAWICK, L. F. Relação hipsométrica para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze na região oeste do Estado do Paraná. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p. 79-88, abr./jun. 2003.

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

DRAGO, D. **Elaboração de um sistema de informação geográfica (SIG) para estação experimental de Rio Negro da UFPR**. 127p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

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: 2001. 900p.

IBÁ - Anuário estatístico da Indústria Brasileira de Árvores: ano base 2013. Brasília, DF: 2014. 97p.

KOEHLER, A. B. Modelagem biométrica e morfometria em povoamentos jovens de *Araucaria angustifolia* (Bert.) KTZE., em Tijucas do Sul, Estado do Paraná. 142f (Doutorado em Mensuração Floresta) – Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

KOEHLER, A. B.; CORAIOLA, M.; NETTO, S. P. Crescimento, tendências de distribuição das variáveis biométricas e relação hipsométrica em plantios jovens de

*Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Ktze., em Tijucas do Sul, PR. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 85, p. 53-62, mar. 2010.

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

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. São Paulo: Plantarum, 1992. 368 p.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná. 3. ed.** – Curitiba: Imprensa Oficial, 2002. 440p.

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZICK, A. L. D. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no Capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n56, p.5-16, jan-jun/2008.

PAULO, J. A., TOMÉ, J. TOMÉ, M. Nonlinear fixed and random generalized height-diameter models for Portuguese cork oak stands. **Annals of Forest Science**, 68: 295-309. 2011.

SANQUETTA, C. R. WATZLAWICK, L. F., DALLA CORTE, A. P.; FERNANDES, L. A. V.; SIQUEIRA, J. D. P. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. Curitiba: Mult-Graf, 2006. 270f.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTÊ, A. P; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária. Trop.**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2014.

SCHIKOWSKI, A. B., DALLA CORTE, A. P., SANQUETTA, C. R. Estudo da forma do fuste utilizando redes neurais artificiais e funções de afilamento. **Pesquisa florestal brasileira.**, Colombo, v. 35, n. 82, p. 119-127, abr./jun. 2015.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; BOTELHO, M. F.; WATZLAWICK, L. C.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Uso de redes neurais artificiais para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de uma floresta ombrófila densa. **Ambiência**, Guarapuava, PR v.4 n.2 p.179-195 Maio/Ago. 2008.

SANTOS, K.; SANQUETTA, C. R.; EISFELD, R. L.; WATZLAWICK, L. F.; ZILLOTTO, M. A. B. Equações volumétricas por classe diamétrica para algumas espécies folhosas da Floresta Ombrófila Mista no Paraná, Brasil. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, v.8, v.1, p.99-112, 2006.

SILVA, M. L. M. Estimção do diâmetro sem casca e diâmetro do cerne para árvores de *Tectona grandis* Linn. utilizando redes neurais artificiais. 2008. 47f. Monografia (Exigência para conclusão do curso de Engenharia Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

URBANO, E. **Quantificação da estimativa da biomassa aérea e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba**. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2007.

## 4 CAPÍTULO IV: REDES NEURAS NA MODELAGEM VOLUMÉTRICA EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze

### 3.1 INTRODUÇÃO

O volume das árvores é, na maioria das vezes, a principal finalidade dos levantamentos florestais, principalmente quando se trata de povoamentos destinados para fins comerciais. Como a medição de todas as árvores em uma floresta é uma tarefa muito onerosa e impraticável, utilizam-se técnicas de inventário para por meio de uma parte da população, ou seja, uma amostra, extrapolar as características para toda a população (MACHADO e FILHO, 2009).

Para estimativa volumétrica é necessário o emprego de equações confiáveis e compatíveis com a população inventariada. Os modelos são obtidos por meio de métodos analíticos como: a cubagem de árvores, a qual divide o tronco em pequenas seções, pelo deslocamento da água, através do peso da árvore e por meio de métodos não analíticos como: modelos volumétricos já existentes para a região. A cubagem rigorosa de árvores é onerosa e um método para diminuição das árvores a serem abatidas por meio da redução da intensidade amostral é de grande valia (CAMPOS e LEITE, 2013).

A quantificação acurada do volume em povoamentos florestais para fins comerciais é de suma importância, sendo a cubagem o meio usual para esse fim. Como a quantificação por meio da cubagem é onerosa, se faz necessário aliar métodos indiretos para sua estimativa, sendo comumente utilizadas as equações de volume, funções de afilamento e fator de forma (SCHRÖDER *et al.*, 2013), que tem como base as variáveis de fácil mensuração, como diâmetro a 1,30 m do solo (dap) e altura total, sendo representados por modelos rígidos, sem flexibilidade.

Um dos principais objetivos dos inventários florestais é a determinação do volume do povoamento ou da floresta e as fórmulas de estimativa podem ser expressas por meio do dap, alguma medida de forma e a altura da árvore (SILVA *et al.*, 2009). Os três principais modelos existentes para estimar volume de árvores são o de Schumacher-Hall, Spurr e o modelo australiano de Stoate. O modelo de Schumacher-Hall é o mais difundido na área florestal por gerar estimativas de boa qualidade, propriedades estatísticas e facilidade de uso (CAMPOS e LEITE, 2009).

Contudo, alguns modelos volumétricos podem apresentar tendenciosidade e erros que não são admissíveis para os objetivos do manejo florestal (BINOTI, 2012).

Desta maneira uma nova ferramenta foi desenvolvida para aplicação das redes neurais artificiais, as quais apresentam resultados comprovados na redução do tempo e o custo para determinação de volume. As RNAs são uma abordagem alternativa para a modelagem volumétrica e vêm se destacando na modelagem florestal e na tomada de decisão com desempenho muitas vezes superior aos métodos tradicionais de regressão (GÖRGENS *et al.*, 2009; LEITE *et al.*, 2010; BINOTI, 2012).

### 3.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi testar as redes neurais artificiais (RNA) para estimar o volume total de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze e comparar o seu desempenho com equações volumétricas tradicionais. Também foi alvo deste trabalho avaliar a sensibilidade da técnica acima descrita, em função da redução na intensidade amostral como uma alternativa para a diminuição do custo na cubagem de árvores.

### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.3.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS

- Cubagem das árvores

Foram cubadas 48 árvores pelo método de Hohenadl, o qual é caracterizado pela divisão do tronco em cinco seções com comprimentos iguais, que são estabelecidos em função da altura ( $h$ ), sendo o volume calculado por apenas uma medida do diâmetro ou circunferência no centro de cada seção como em Huber (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2003). Pela fórmula original, estimam-se volumes menos precisos, pois quanto maior a altura da árvore mais longas serão as seções. Para contornar esse problema o número de medições sobre o tronco é aumentado (MACHADO E FIGUEIREDO FILHO, 2003).

Após isso, três etapas foram seguidas no processamento: seleção do melhor modelo de regressão, seleção da melhor RNA, comparação entre o melhor modelo de regressão e a melhor RNA. A primeira e a segunda etapa foram procedidas com 100% da base de dados, ou seja, com as 48 árvores cubadas. Na terceira etapa, as comparações foram feitas primeiramente entre o melhor modelo e a melhor RNA com base nos 100% dos dados. Não houve validação nesta etapa, bem como, nas anteriores. As comparações foram procedidas com base nas estatísticas e gráficos provenientes dos ajustes (regressões) e treinamentos (RNAs).

Posteriormente diminui-se a intensidade amostral para 50% e 25% das árvores cubadas, abrangendo todas as classes diamétricas apresentadas. O melhor modelo ajustado e a melhor RNA treinada nas reamostragens foram validados (aplicados) no restante da base de dados (i.e. 50% e 75%, respectivamente). Aqui, as comparações foram procedidas com base nas estatísticas e gráficos provenientes das validações e tem o intuito de verificar uma possível diminuição das árvores cubadas em campo.

- Modelagem volumétrica por regressão

Foram testados cinco modelos tradicionais de regressão relacionados na TABELA 6, os quais tem o dap (diâmetro altura do peito) e altura total da árvore como variáveis independentes para o ajuste da equação de volume. As equações para determinação de volume sólido são necessárias e indispensáveis, no entanto, como elas são de natureza empírica há uma necessidade de ajustá-las com frequência para adaptá-las as diferentes características da região, idade, espaçamento que estão inseridas (GOMES, 1993). Os modelos matemáticos foram retirados de trabalhos com *Araucaria angustifolia* (HESS, 2007; LEAL, 2015).

Após o ajuste dos modelos de natureza logarítmica é necessária a correção da discrepância logarítmica (MACHADO e FIGUEIREDO E FILHO, 2003; CALDEIRA, 2003; SANTOS, 2006; KOEHLER, 2009; SANQUETTA, 2013). Esta correção é feita pela multiplicação do exponencial da variável resposta pelo fator de Meyer (URBANO, 2007; MACHADO, 2008).

TABELA 6: EQUAÇÕES DE REGRESSÕES TESTADAS PARA ESTIMAR O VOLUME EM FUNÇÃO DO DAP EM POVOAMENTOS DE *Araucaria angustifolia*.

Equação	Modelo
$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(dap) + \beta_2 * \ln(h)$	Schumacher-Hall
$v = \beta_0 + \beta_1 * (dap^2 * h)$	Spurr
$v = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 + \beta_2 * (dap^2 * h) + \beta_3 * h$	Stoate
$\ln v = \beta_0 + \beta_1 * \ln(dap^2 * h)$	Meyer
$\ln v = \beta_0 + \beta_1 * \ln dap$	Husch

Nota:  $h_t$  é a altura total das árvores individuais (m); dap é o diâmetro à 1,30 m do solo (cm);  $\beta$ 's são os coeficientes a serem estimados; v é o volume em  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ; ln é o logaritmo neperiano;

Fonte: O Autor (2015)

Para a seleção do melhor modelo volumétrico os seguintes parâmetros estatísticos foram calculados e comparados: erro padrão de estimativa em percentagem ( $S_{yx}\%$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), a correlação de Pearson ( $r_{H\hat{H}}$ ) entre os valores observados e estimados e gráfico de dispersão de resíduos.

- Modelagem volumétrica por RNA

O treinamento das redes foi feito com objetivo de determinar os volumes das árvores de *A. angustifolia*. As variáveis de entrada foram  $d_{ap}$  e altura total ( $h_t$ ) e, como variável de saída, foi utilizado o volume das árvores cubadas. No presente estudo o algoritmo de treinamento utilizado foi o *Resilient Propagation*, proposto por Riedmiller e Braun (1993), como alternativa mais eficiente e recomendada para RNAs do tipo *Multilayer Perceptron*.

Como critério de parada do algoritmo de treinamento utilizou-se o número total de ciclos igual a 30.000 ou erro quadrático médio inferior a 1%, conforme sugerido por Silva e Oliveira (2006). Portanto, finalizou-se o treinamento quando um dos critérios foi atingido e a melhor rede para estimar o volume foi selecionada.

Para a seleção da melhor rede as estatísticas utilizadas para comparação foram: *bias*, RQME e correlação de Pearson entre os valores observados e estimados. A rede selecionada foi aplicada para os dados separados para generalização.

- Comparação entre a regressão e a Rede Neural Artificial

Para comparação entre o melhor modelo ajustado e a melhor rede neural as estatísticas utilizadas foram: a RQEM, o  $r_{H\hat{H}}$  entre altura observada e altura estimada, eficiência do modelo (EF), *bias* e gráfico de dispersão de resíduos em função do volume.



### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na TABELA 7, são apresentados os resultados estatísticos das equações testadas, conforme TABELA 6, para ajustar o volume com casca em função do diâmetro e da altura de *A. angustifolia*. O melhor modelo ajustado foi o de Schumacher-Hall, por apresentar a melhor dispersão nos gráficos de resíduos e as estatísticas de qualidade de ajuste elevadas corroborando com outros trabalhos em Araucária (OLIVEIRA, *et al.*, 2011; MATTOS *et al.*, 2010; HESS *et al.*, 2007; SCHNEIDER-FINGER, 2000).

TABELA 7: RESULTADO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO DOS AJUSTES DAS EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS

EQUAÇÃO	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R^{2ajus}$	$S_{xyrec}(\%)$	$r_{V\hat{V}}$	FCM
Schumacher-Hall	-9,99372	1,8965	1,109	-	0,9982	8,8002	0,9957	1,001953
Spurr	0,04969	0,0000413	-	-	0,9899	8,7589	0,9950	
Stoate	-0,23054	6,37E-05	3,55E-05	0,01885	0,9919	7,8558	0,9962	
Meyer	-9,7993	0,9771318	-	-	0,9981	8,9351	0,9955	1,001996
Husch	-8,32282	2,3708593	-	-	0,9928	22,3402	0,9705	1,007919

\*Todos os coeficientes das equações e as correlações de Pearson foram significativos a 5% de significância. FCM – Fator de correção de Meyer

FONTE: O Autor (2015)

Os resultados apontam coeficientes de determinação ajustado com valores superiores a 0,99 indicando uma alta correlação dos modelos testados com os dados. As equações apresentaram baixos erros padrões da estimativa, o qual é indicador de quanto o modelo erra em média. A única exceção foi o modelo de Husch que apresentou  $S_{yx}\%$  elevado.

Outra forma de análise do melhor modelo foi por meio das distribuições dos resíduos das equações ajustadas para a *A. angustifolia* apresentadas na FIGURA 6. A equação de Meyer e a de Schumacher-Hall foram as que apresentaram melhor distribuição, enquanto as de Spurr e Prodan apresentaram certa tendência de subestimar as alturas para as classes de volume até 1 m<sup>3</sup>.

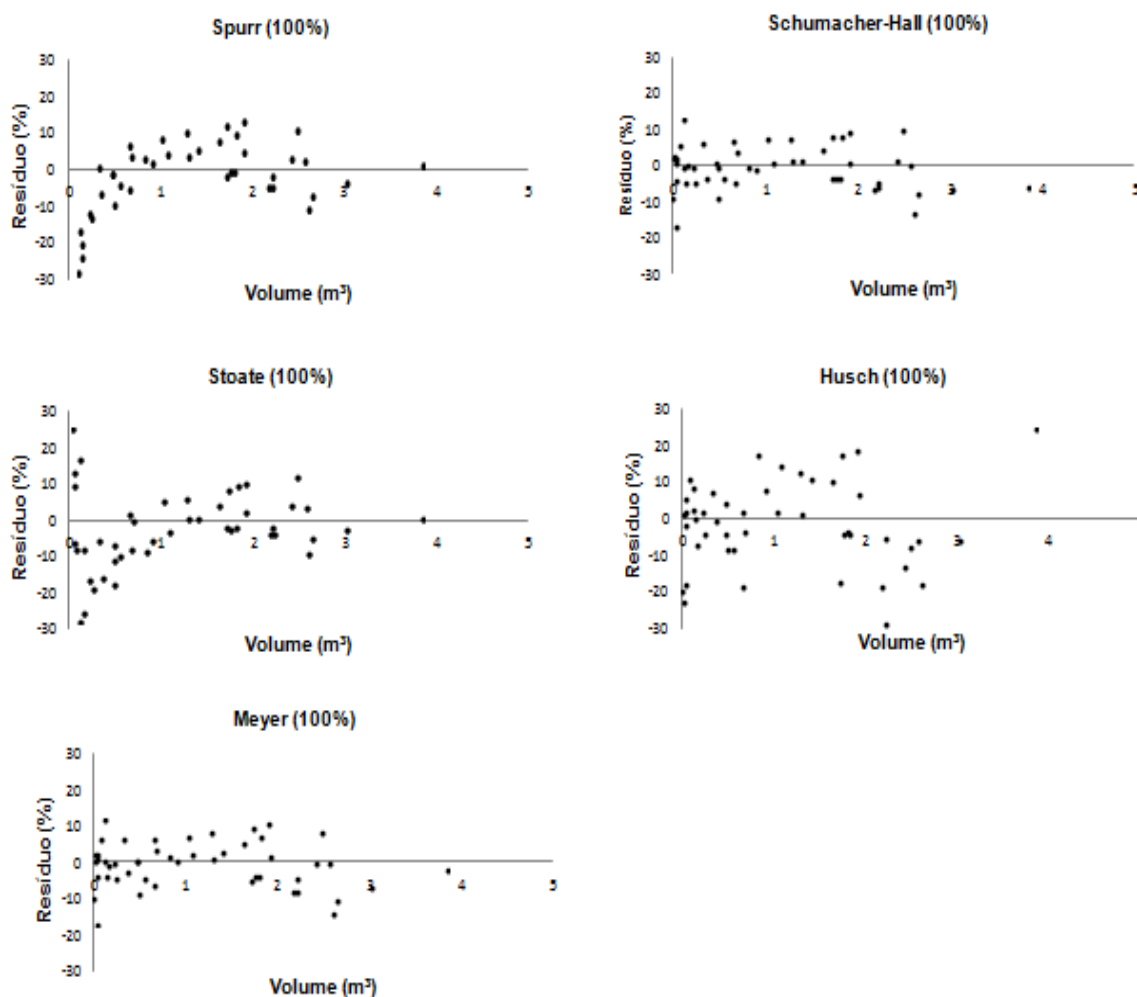


FIGURA 6: DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO VOLUME PARA OS SEIS MODELOS AJUSTADOS PARA POVOAMENTOS PUROS EQUIÂNEOS DE *Araucaria angustifolia* NO SUL DO BRASIL.

Fonte: O Autor (2015)

### 3.4.1 Rede Neural Artificial

Foi utilizada a arquitetura MLP com dois neurônios na camada de entrada ( $d_{ap}$  e  $h_t$ ), cinco na camada oculta e um na camada de saída (volume total). Foram treinadas cinco redes sendo o tipo de treinamento *Resilient Propagation* e função de ativação tangente hiperbólica. Os critérios de parada foram os mesmos adotados para a relação hipsométrica.

A descrição das RNAs obtidas, as estatísticas de treinamento e a melhor rede com base nos parâmetros gerados são apresentadas na (TABELA 8). A RNA 1 foi a que apresentou os melhores parâmetros estatísticos, entretanto todas estas cinco RNAs apresentaram boas estatísticas de qualidades de ajuste com valores

próximos. A avaliação das estatísticas das redes mostra alta correlação e baixos RQME (%) o que comprova que as estimativas geradas são precisas.

TABELA 8 - COEFICIENTES E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS FORNECIDOS PELO NEUROFOREST 3.0 PARA SELEÇÃO DA MELHOR REDE

<b>RNA</b>	<b>Bias</b>	<b>RQME</b>	<b><math>r_{V\hat{V}}</math></b>
<b>RNA 1</b>	0,8130	1,0882	0,9970
<b>RNA 2</b>	0,8131	1,0889	0,9971
<b>RNA 3</b>	0,8123	1,0866	0,9968
<b>RNA 4</b>	0,8131	1,0889	0,9971
<b>RNA 5</b>	0,8145	1,0928	0,9979

FONTE: O Autor (2015)

### 3.4.2 Rede Neural Artificial X Equação Volumétrica

A RNA selecionada apresentou-se superior ao melhor modelo volumétrico em relação as estatísticas de qualidade de ajuste (TABELA 9), entretanto em relação a distribuição de resíduos a RNA apresentou-se mais tendenciosa para volumes de até 1 m<sup>3</sup> (FIGURA 7).

TABELA 9 - ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE PARA A MODELAGEM DO VOLUME DE ÁRVORES DE *Araucaria angustifolia*, REDES NEURAS ARTIFICIAS (RNA) E A EQUAÇÃO DE SCHUMACHER-HALL.

<b>Modelo</b>	<b>RQME</b>	<b><math>r_{V\hat{V}}</math></b>	<b>Bias</b>	<b>EM</b>
<b>RNA</b>	6,73	0,9970	0,00269	0,9999
<b>Schumacher-Hall</b>	8,80	0,9957	0,01322	0,9896

\*RQEM- Raiz quadrada do erro médio;  $r_{HH}$  - correlação de Pearson entre as alturas observadas e estimadas; EM-eficiência do modelo.

FONTE: O Autor (2015)

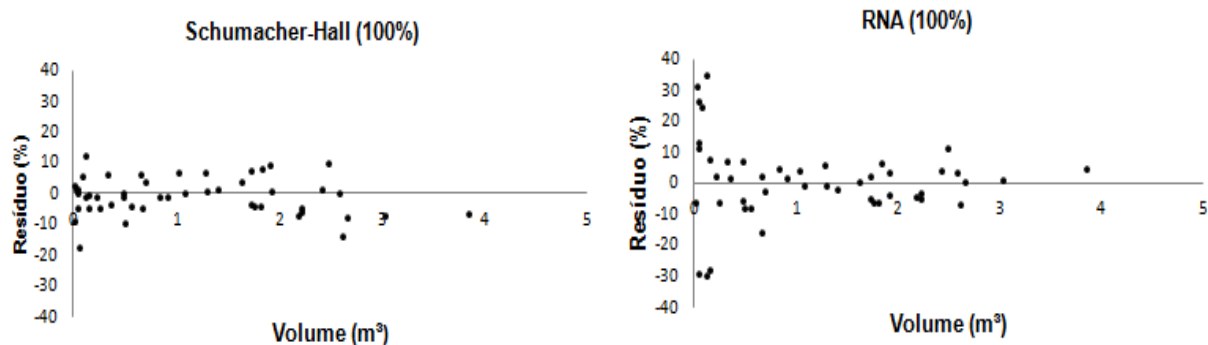


FIGURA 7: DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO VOLUME EM METROS CÚBICOS PARA A EQUAÇÃO DE SCHUMACHER-HALL E PARA A REDE NEURAL ARTIFICIAL.  
 FONTE: O Autor (2015)

Na FIGURA 8 são apresentadas as relações entre as distribuições do volume observado e estimado para RNA e Schumacher-Hall.

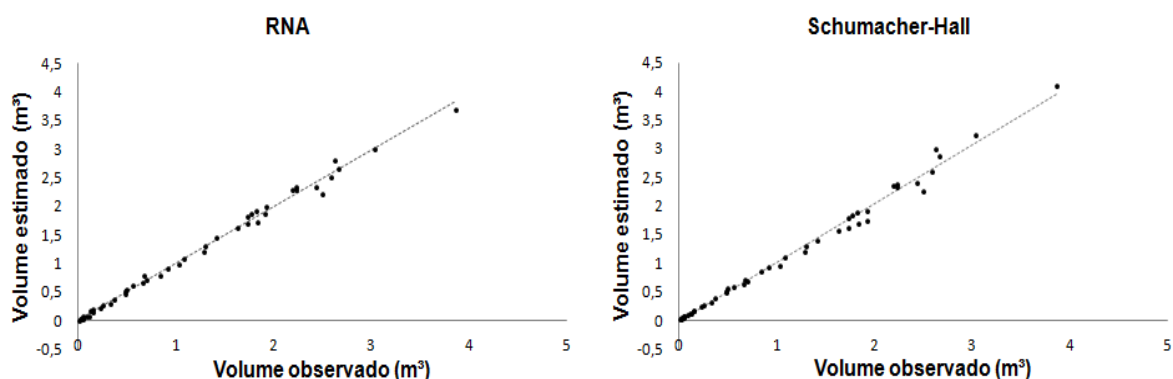


FIGURA 8: VOLUMES OBSERVADOS E ESTIMADOS PARA *Araucaria angustifolia* UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE SCHUMACHER-HALL E A MELHOR REDE NEURAL SELECIONADA. A LINHA TRACEJADA, PARA FINS DE COMPARAÇÃO, REPRESENTA A RELAÇÃO 1:1, OU SEJA, A CORRESPONDÊNCIA PERFEITA ENTRE A ALTURA ESTIMADA E A OBSERVADA.

FONTE: O Autor (2015)

### 3.4.3 Redução da Intensidade Amostral

Na TABELA 10 são apresentadas as estatísticas de validação para diminuição da intensidade amostral das árvores cubadas. As estatísticas apresentadas correspondem a 75% e 50% das árvores cubadas.

TABELA 10 ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO CORRESPONDENTES ÀS REDUÇÕES AMOSTRAIS NA MODELAGEM DO VOLUME EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO SOLO (DAP) E ALTURA TOTAL DE ÁRVORE DE *Araucaria angustifolia*, UTILIZANDO O MELHOR MODELO DE REGRESSÃO E A MELHOR RNA.

Estatísticas	RNA			Modelo de Schumacher-Hall		
	Reamostragem (%)			Reamostragem (%)		
	100*	50	25	100*	50	25
<b>RQEM</b>	6,7368	3,51	6,2384	8,8000	12,2300	11,1000
<b>Bias</b>	0,0026	0,0029	0,0580	0,0132	-0,0706	-0,0312
<b>EM</b>	0,9974	0,9986	0,9291	0,9896	0,9758	0,9825
<b><math>r_{HH}</math></b>	0,9970	0,9993	0,9685	0,9957	0,9951	0,9941

EM= eficiência do modelo ;  $r$  = correlação de Pearson entre valores observados e estimados; RQEM= raiz quadrada do erro médio; Reamostragem = percentagem da base de dados utilizada no ajuste/treino. Complementarmente a validação é procedida com 1 – a reamostragem.\*= quando 100% dos dados foram utilizados as estatísticas correspondem ao treino/validação.

FONTE: O Autor (2015)

Com base nos resultados estatísticos obtidos pode se aferir que a RNA se mostrou superior com a diminuição de até 50% da base de dados, no entanto com 25% apresentou uma diminuição da correlação entre o volume observado e o estimado. Embora os resultados gerados pelas RNAs não sejam fixos, ou seja os resultados não retornam sempre o mesmo por se tratarem de heurísticas, os ajustes gerados se mostraram melhores que os ajustes obtidos pelo modelo de regressão. As RNAs tem como fator relevante a facilidade de uso muito maior, pois podem ser adicionadas novas variáveis de entrada sem que seja preciso fazer alterações no modelo ou na forma de aplicação (BINOTI, 2012).

Pelos gráficos de dispersão das validações (FIGURA 9), a equação de Schumacher-Hall apresentou uma distribuição mais homogênea em comparação com a rede neural.

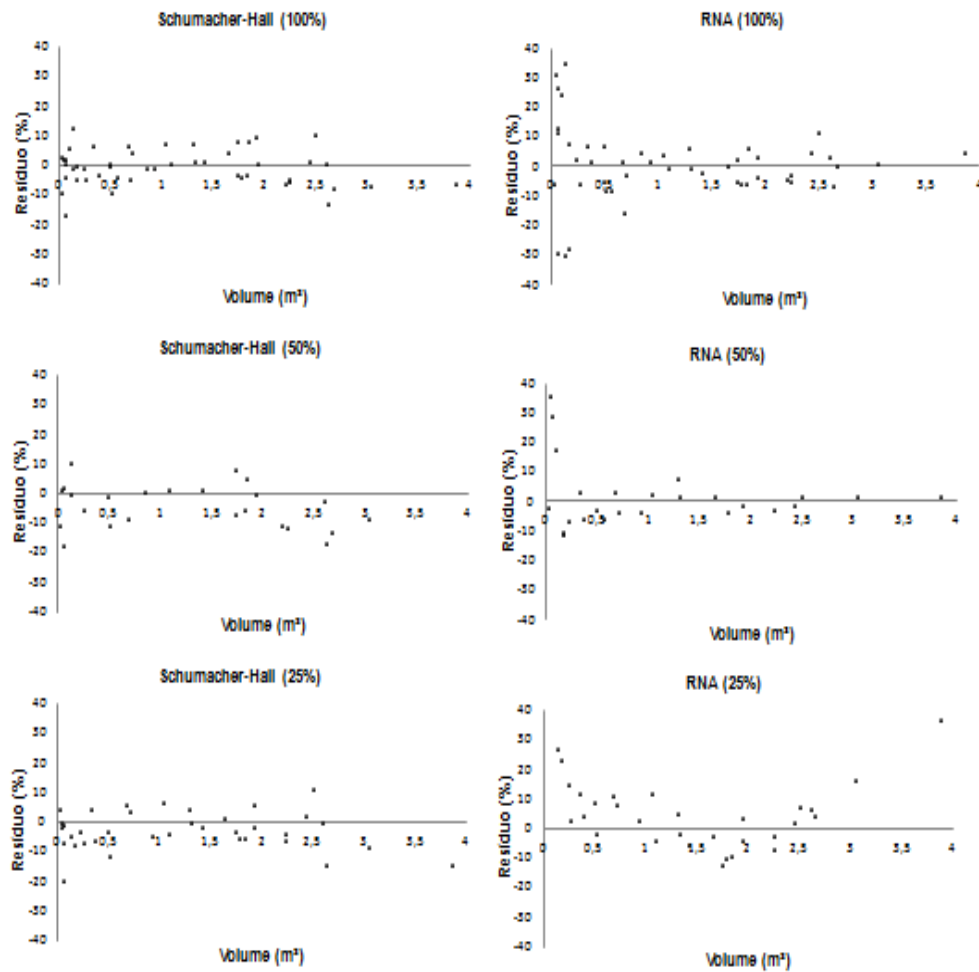


FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO ALTURA DO PEITO (DAP), PARA VALIDAÇÃO DAS AMOSTRAGENS NAS REDES NEURAIS E NA REGRESSÃO.

FONTE: O Autor (2015)

### 3.5 CONCLUSÃO

Tanto as redes neurais artificiais quanto a equação de Schumacher-Hall obtiveram resultados satisfatórios na estimativa do volume total de árvore de *A. angustifolia*. As redes neurais, no entanto, foram ligeiramente superiores no uso de 100% da base de dados quanto na diminuição do tamanho da amostra em até 50%. Com uma redução mais forte a equação de Schumacher-Hall se mostrou superior.

### 3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de Redes Neurais Artificiais em mensuração e manejo florestal**. 130f. (Doutorado em Mensuração Florestal) – Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2012.
- FRANCO, S. A. P. Estrutura e volume de povoamento de um remanescente de Floresta Estacional Semidecidual em Curvelo, MG. Dissertação em Recursos Florestais, Universidade Federal do Vale dos Jequitinhonhas, Diamantina, Minas Gerais, 2012. 70f.
- GOMES, F. P., GARCIA, C. H. A determinação de equações volumétricas na Engenharia Florestal. IPEF Série Técnica, Piracicaba, 9(26): 1-36, mar.1993
- GORGENS, E. B., LEITE, H. G., SANTOS, H. N., GLERIANI, J. M. Estimate of tree volume using artificial neural nets. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1141-1147, 2009.
- HESS, A. F.; SCHNEIDER, P. R. Crescimento em volume de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em três regiões do Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 107-122, jan-mar., 2010.
- MACHADO, S. A. FILHO, A. F. **Dendrometria**. 2ª edição – Guarapuava: UNICENTRO, 2009. 295 p.
- MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; BRENDT, E. J.; OLIVEIRA, Y. M. M. Equação de volume para araucárias centenárias da Reserva Florestal Embrapa/Epagri. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 4p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 256).
- OLIVEIRA, M. F.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; ROSOT, M. A. D.; ROSOT, N. C.; SANTOS, W. C. Equação de volume para um plantio de *Araucaria angustifolia* em Rio Negro, PR. Colombo: Embrapa Florestas, 2011 4p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 275).
- SCHNEIDER, P. R; FINGER, C. A. G. Manejo sustentado de florestas inequiâneas heterogêneas. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Ciências Florestais, 2000. 195 p.
- SILVA, M. L. M., BINOTI, D. H. B., GLERIANI, J. M., LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher-Hall e aplicação das redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1133-1139, 2009.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As RNAs constituem uma nova alternativa para ser empregada por empresas de base florestal no lugar dos modelos tradicionais de regressão;
- Bons ajustes e facilidade de uso agregada;
- Possibilidade de substituir modelos hipsométricos e volumétricos para *Araucaria angustifolia* por RNA sem perder qualidade e precisão nos resultados;
- Ferramenta importante na tomada de decisão;
- A vantagem do uso *NeuroForest* é que se trata de um software *userfriendly*, de fácil manuseio e gratuito;