

MARIA DOLORES DOS SANTOS BARZOTTO RIBEIRO

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS DE
Eucalyptus spp.: ASSOCIAÇÕES COM VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO
E ESTIMATIVAS COM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**

Botucatu

2018

MARIA DOLORES DOS SANTOS BARZOTTO RIBEIRO

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS DE
Eucalyptus spp.: ASSOCIAÇÕES COM VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO
E ESTIMATIVAS COM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Adriano W. Ballarin

Coorientador: Prof. Dr. Hélio Garcia Leite

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

R484d Ribeiro, Maria Dolores dos Santos Barzotto, 1986-
Densidade básica da madeira de plantios florestais de Eucalyptus spp.: associações com variáveis do sítio e do plântio e estimativas com redes neurais artificiais / Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro. - Botucatu: [s.n.], 2018
110 f.: grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2018
Orientador: Adriano W. Ballarin
Coorientador: Hélio Garcia Leite
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Madeira - Densidade. 3. Redes neurais (Computação). 4. Mudanças climáticas. I. Ballarin, Adriano W. II. Leite, Hélio Garcia. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* spp: ASSOCIAÇÕES COM VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E ESTIMATIVAS COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS."

AUTORA: MARIA DOLORES DOS SANTOS BARZOTTO RIBEIRO
ORIENTADOR: ADRIANO WAGNER BALLARIN
COORIENTADOR: HÉLIO GARCIA LEITE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN
Depto de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE BREDÁ BRINOTI
Depto de Engenharia Florestal / Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. OSVALDO CESAR PINHEIRO DE ALMEIDA
/ Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof. Dr. SAULO PHILIPÉ SEBASTIÃO GUERRA
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Prof. Dr. SÉRGIO AUGUSTO RODRIGUES
Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu/ FCA/ UNESP

Botucatu, 01 de dezembro de 2017.

À minha família,
Dedico

AGRADECIMENTOS

À Mãe Rainha e Vencedora Três Vezes Admirável de Schoenstatt.

Ao meu esposo Adisnei pelo apoio e compreensão em toda nossa caminhada.

A nossa amada Melissa, que acompanhou este trabalho desde o início, ainda dentro da barriga no processamento dos dados e durante a redação final, me enchendo de carinho. Aos meus pais Luiz Alberto e Maria Cristina, pelo apoio incondicional em todas as etapas deste projeto. Aos meus irmãos, Junior e André, pelo exemplo de dedicação em tudo o que fazem.

Ao Prof. Adriano Wagner Ballarin, pela amizade e incentivo em todos os momentos, pelos exemplos de conduta e pela orientação durante o mestrado e agora no doutorado, sendo uma valiosa contribuição acadêmica e profissional.

Ao Prof. Hélio Garcia Leite, pela amizade, apoio e oportunidade de co-orientação que tanto enriqueceu este trabalho.

Ao Prof. Daniel Henrique Breda Binoti, que a qualquer hora e qualquer dia sempre esteve ajudando. Pelos ensinamentos, paciência e amizade.

Aos membros da banca da qualificação, Prof. Cesar e Prof. Saulo, que tanto contribuíram nas discussões e estruturação do trabalho.

À Klabin Florestal Santa Catarina pelo apoio nos momentos de ausência da empresa para resolver questões da tese. Aos amigos que conquistei na Unidade de Otacílio Costa, uma ajuda valiosa no desenvolvimento deste trabalho, em especial Marcos Antonio Guimarães, João Paulo Czarnecki de Liz e Arthur Bratti Schmidt.

À Duratex Florestal por ter fornecido os dados, em especial a José Ricardo Paraíso Ferraz, Valerio Cosme Sales Tiburcio, Anderson Lins, Anderson Luiz Wantroba e Rodrigo Ribeiro de Castro. À Edson Dionízio, Fernando Cagnoni da Silva, Messias Dias dos Santos Filho e Lucas Machado Rodrigues, por todo apoio no desenvolvimento final desse trabalho.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

A densidade básica da madeira é uma das mais importantes propriedades que afetam o processo produtivo na indústria de base florestal. Sendo a madeira o resultado da combinação da quantidade e da distribuição dos diferentes elementos anatômicos e suas inter-relações com os fatores externos que tangem sobre ela, estudar a associação destas variáveis na formação da madeira, isoladamente, permite tomar decisões mais assertivas quanto ao manejo integrado do sítio, proporcionando ganhos em produtividade e qualidade. As taxas de crescimento de um povoamento florestal e a densidade da madeira são influenciadas pelas variáveis de sítio e de plantio de forma distinta, com tendência ora positiva, ora negativa. A inclusão dessas variáveis em um modelo de estimativa de densidade básica, apesar de possibilitar um maior realismo biológico, traz complexidades à modelagem e à quantificação destas influências. Além disso, alguns componentes qualitativos – variáveis categóricas - como a classificação do tipo de solo e material genético geram dificuldades de modelagem ao serem integrados em equações matemáticas. Assim, em muitos casos, devido às complexidades de ajuste, os modelos estatísticos tornam-se limitados na solução problemas estruturados da gestão de recursos florestais. A técnica de Redes Neurais Artificiais é alternativa para modelagem linear e não linear, estimando a densidade básica a partir de bases de dados históricos para um cadastro de informações semelhantes pelo método de generalização. Neste trabalho, a partir dos dados históricos de 25 materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. - 14 clonais e 11 seminais - em primeira e segunda rotação, com idades variando de 4 a 11 anos e cultivados em cinco regiões edafoclimáticas distintas, foi estudada a densidade básica da madeira com e sem casca de 1.217 árvores. Primeiramente, foram estabelecidas as correlações canônicas entre as variáveis do sítio, do plantio e a densidade básica da madeira, com e sem casca. Foram avaliadas duas funções, sendo ambas significativas a 1% de probabilidade. Apenas a primeira função canônica apresentou alto coeficiente de determinação canônico (0,762). Esses resultados preliminares mostram que as correlações canônicas são eficientes para explicar as correlações existentes entre as variáveis do sítio e do povoamento com a formação da madeira e sua densidade básica. Posteriormente, a técnica de Redes Neurais Artificiais foi empregada na

estimativa da densidade básica da madeira utilizando variáveis ambientais e do plantio, sendo esta última dividida em dois bancos de dados, consultando a informações do inventário florestal pré-corte e também, avaliando as redes permanentes de parcelas do inventário florestal contínuo. A técnica de Redes Neurais Artificiais proporcionou estimativas satisfatórias da densidade básica da madeira, com raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 1,92% para densidade com casca e 2,01% para sem casca para dados do inventário florestal pré-corte e RMSE de 1,97% para densidade com casca e 2,06% para sem casca com dados do inventário florestal contínuo, mostrando-se, assim, ferramenta rápida e eficaz. Além do potencial estatístico, a técnica proporciona redução de custo operacional, por utilizar bases de dados de séries históricas para o ajuste das estimativas, reduzindo a necessidade de novas amostragens.

Palavras-chave: Funções canônicas; Variáveis climáticas; Redes Neurais Artificiais; Inventário florestal; *Eucalyptus* spp.

ABSTRACT

The wood basic specific gravity is one of the most important characteristics affecting the productive process in the forest-based industry. Since wood is the result of the combination of the quantity and distribution of the different anatomical elements and their interrelations with the external factors that affect them, studying the association of these variables in the formation of wood alone allows us to make more assertive decisions regarding the management of the site, providing gains in productivity and quality. The growth rates of a forest stand and the wood specific gravity are influenced by the edaphoclimatic variables in a distinct way, with a positive and sometimes negative trend. The inclusion of these variables in a basic specific gravity estimation model, in spite of allowing a greater biological realism, brings complexity to the modeling and quantification of these influences. In addition, some qualitative components - categorical variables - such as soil type classification and genetic material cannot be integrated into mathematical equations. Thus, in many cases, statistical models cannot be used more broadly to solve structured problems of forest resource management. The Artificial Neural Networks technique is an alternative for linear and nonlinear modeling, estimating the basic specific gravity from historical databases for a whole register of similar information by the generalization method. In this work, from the historical data of 25 genetic material of *Eucalyptus* spp. - 14 clonal and 11 seminal - in first and second rotation, with ages varying from 4 to 11 years and cultivated in five distinct edaphoclimatic regions, the wood basic specific gravity of 1,217 trees was studied. Firstly, the canonical correlations were established between site variables, planting density and wood basic specific gravity (evaluated in disks with and without bark). Two functions were evaluated, both of which were significant at 1% probability. Only the first canonical function had a high coefficient of canonical determination (0.762). These preliminary results show that the canonical correlations are efficient to explain the correlations between site and settlement variables with the formation of wood and its basic specific gravity. Subsequently, the Artificial Neural Networks technique was used to estimate the wood basic specific gravity using environmental and planting variables, the latter being divided into two databases, referring to information from the pre-cut forest inventory and also evaluating the permanent networks of parcels of the continuous

forest inventory. The Artificial Neural Networks technique provided satisfactory estimates of the wood basic specific gravity using data from pre-cut forest inventory, with root mean square error (RMSE) of 1.92% for analysis with full disks (wood+bark) and 2.01% for analysis considering disks without bark; RMSE was 1.97% and 2.06%, respectively, using data from the continuous forest inventory, thus showing a fast and efficient tool. In addition to statistical potential, the technique provides operational cost reduction using historical series databases to adjust estimates, reducing the need for new samplings.

Keywords: Canonical functions; Climatic variables; Site; Forest Inventory; *Eucalyptus* spp.

LISTA DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO 1 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.	35
Tabela 1.1 – Características edafoclimáticas das cinco regiões de estudo	40
Tabela 1.2 – Valores médios das variáveis analisadas por região edafoclimática ...	42
Tabela 1.3 – Coeficientes das funções canônicas, correlação canônica entre as variáveis de perfil (u_t), densidade (v_t), autovalor e resultado do teste estatístico de significância da correlação.....	44
Tabela 1.4 – Cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas do primeiro par de variáveis (u_1, v_1)	45
CAPÍTULO 2 – EMPREGO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO PRÉ-CORTE	55
Tabela 2.1 – Características edafoclimáticas das cinco regiões de estudo.....	60
Tabela 2.2 – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão das variáveis analisadas.....	62
Tabela 2.3 – Valores médios das variáveis analisadas por região edafoclimática ...	64
Tabela 2.4 – Valores médios da amostragem de densidade básica da madeira com e sem casca por material genético.	65
Tabela 2.5 – Características e estatísticas da RNA selecionada para estimar a densidade básica da madeira.	67
CAPÍTULO 3 - EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO	78
Tabela 3.1 – Características edafoclimáticas dos municípios nas cinco regiões do estudo	85
Tabela 3.2 – Dados dos plantios e das densidades básicas com e sem casca.....	86
Tabela 3.3 – Análise descritiva das mensurações de densidade básica com e sem casca	89

Tabela 3.4 – Estimativas de densidade básica com e sem casca geradas pela RNA para os materiais genéticos.....	90
Tabela 3.5 – Características e precisão da RNA selecionada para estimar a densidade básica da madeira.....	91

LISTA DE FIGURAS

	Página
INTRODUÇÃO GERAL	19
Figura 1 – Modelo genérico de arquitetura de RNA, com uma camada de entrada, uma camada oculta e duas camadas de saída	32
CAPÍTULO 1 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE EUCALYPTUS	35
Figura 1.1 – Mapa das regiões climáticas (Köppen) brasileiras e regiões de coleta dos dados: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4.	39
Figura 1.2 – Associação entre densidade básica da madeira sem casca - D_{bsc} , textura do solo e área vital ($m^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$) para os dados analisados. ...	43
Figura 1.3 – Associação entre densidade básica da madeira sem casca - D_{bsc} ($kg \cdot m^{-3}$), área vital ($m^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$) e área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$) para os dados analisados.	43
Figura 1.4 – Gráfico de dispersão dos escores padronizados de cada par de variáveis canônicas.	45
CAPÍTULO 2 – EMPREGO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO PRÉ-CORTE	55
Figura 2.1 – Municípios de coleta dos dados divididos em cinco zonas edafoclimáticas: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4.	59
Figura 2.2 – Índices de precipitação de 2006-2013 para as cinco regiões edafoclimáticas	61
Figura 2.3 – Variação da densidade básica sem casca ($kg \cdot m^{-3}$) com a produtividade ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) e a precipitação anual acumulada (mm).	66
Figura 2.4 – (A) Relação entre valores observados e estimados para a densidade básica; (B) Dispersão dos resíduos - erros percentuais - nas estimativas em função dos valores observados de densidade básica; (C) Histograma dos erros nas estimativas pelas RNA.	68

CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO 78

Figura 3.1 – Regiões de coleta dos dados envolvendo cinco zonas edafoclimáticas: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4.82

Figura 3.2 - Índices de precipitação das cinco regiões edafoclimáticas no período de 2006-2013.84

Figura 3.3 - Índices de temperatura média das cinco regiões edafoclimáticas no período de 2006-2013.84

Figura 3.4 – (A) Relação entre valores observados e estimados para a densidade básica; (B) Dispersão dos resíduos - erros percentuais - nas estimativas em função dos valores observados de densidade básica; (C) Histograma dos erros nas estimativas pelas RNA.93

SUMÁRIO

Página

INTRODUÇÃO GERAL	19
REVISÃO DE LITERATURA	21
Produtividade e qualidade silvicultural em plantios de <i>Eucalyptus</i>	21
Efeitos do sítio na produtividade e na densidade básica da madeira	23
Efeito do manejo florestal na produtividade e na densidade básica da madeira ...	25
Correlações entre variáveis do sítio e do plantio na densidade básica da	27
Monitoramento do estoque de madeira no setor florestal	28
Redes Neurais Artificiais - aplicação potencial na estimativa da densidade	30
Arquitetura e aprendizagem das Redes Neurais Artificiais	31
Aplicação das Redes Neurais Artificiais na área florestal	34
CAPÍTULO 1 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.	35
1.1 INTRODUÇÃO	37
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	38
1.2.1 Material experimental	38
1.2.2 Características analisadas do sítio e do plantio	39
1.2.3 Correlações canônicas	41
1.3 RESULTADOS	41
1.3.1 Características analisadas	41
1.3.2 Correlações canônicas	44
1.4 DISCUSSÃO	46
1.4.1 Características analisadas	46
1.4.2 Correlações canônicas	48
1.5 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50
CAPÍTULO 2 – EMPREGO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO PRÉ-CORTE	55
2.1 INTRODUÇÃO	56
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	58
2.2.1 Local dos plantios e características edafoclimáticas das regiões	58

2.2.2	Dados do povoamento	62
2.2.3	Redes Neurais Artificiais – treinamento e generalização	62
2.3	RESULTADOS	64
2.3.1	Densidade básica da madeira	64
2.3.2	Processamento das Redes Neurais Artificiais	66
2.4	DISCUSSÃO	69
2.4.1	Densidade básica da madeira	69
2.4.2	Estimativas da densidade básica da madeira pelas RNA	71
2.5	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	73
	CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO	78
3.1	INTRODUÇÃO	79
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	82
3.2.1	Material experimental	82
3.2.2	Redes Neurais Artificiais – treinamento e generalização	87
3.3	RESULTADOS	89
3.3.1	Variações na densidade básica da madeira amostrada e estimada	89
3.3.2	Característica e precisão das Redes Neurais Artificiais	91
3.4	DISCUSSÃO	94
3.4.1	Densidade básica da madeira	94
3.4.2	Estimativa da densidade básica da madeira pelas RNA	95
3.5	CONCLUSÃO	96
	REFERÊNCIAS	96
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
	REFERÊNCIAS	102

INTRODUÇÃO GERAL

A qualidade dos produtos florestais industrializados está intimamente relacionada à uniformidade da madeira, sua matéria prima. Por essa razão, a predição da qualidade da madeira produzida é essencial para as decisões estratégicas de abastecimento industrial.

As propriedades consideradas importantes para caracterizar a qualidade da madeira podem variar dependendo do uso final, porém a densidade básica é considerada o principal indicador da qualidade, pois se correlaciona com outras propriedades tecnológicas da madeira (LOBÃO et al., 2004; TOMAZELLO FILHO, 2006). A densidade básica afeta todos os processos nos quais a madeira está presente, incluindo a polpação (QUEIROZ et al., 2004), carbonização (COSTA et al., 2017), produção de painéis de madeira (BELINI et al., 2008) entre outros. Apesar da alta herdabilidade genética da densidade da madeira (OTEGBEYE; KELLISON, 1980; KAGEYAMA; VENCOVSKY, 1983), as condições ambientais desempenham um papel importante no desenvolvimento e qualidade da floresta. Foelkel (2009) assegura que a densidade básica está associada diretamente aos fatores ambientais, como solo, clima, pragas, doenças, declividade, déficit hídrico e luminosidade.

A indústria de base florestal por muitos anos tem buscado gerenciar o problema da alta variabilidade da madeira utilizada como matéria-prima no processo fabril. Programas de melhoramento genético e melhorias nas práticas silviculturais têm contribuído para o aumento da produtividade e dos padrões de qualidade da madeira.

As relações entre as propriedades da madeira, as taxas de crescimento das árvores e as variáveis ambientais tendem a variar amplamente entre locais (DOWNES et al., 1997; SANDERCOCK et al., 1995). Dizer que uma espécie é adaptável a uma ampla gama de locais não significa necessariamente afirmar que as espécies, plantadas em diferentes condições, se desenvolverão com as mesmas características físicas e anatômicas e, conseqüentemente, com os padrões de qualidade desejados (MAURI et al., 2015). Por esse motivo, muitos estudos vêm sendo realizados para esclarecer às variações nas densidades básicas devidas as condições de crescimento - interação entre genótipo x ambiente - (RIBEIRO; ZANI

FILHO, 1993; BOURIAUD et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2012; DA SILVA et al., 2016) e as conclusões obtidas nem sempre são concordantes.

Compreender e traçar tendências de comportamento da variável densidade básica para o gênero *Eucalyptus* é complexo porque as propriedades da madeira são o resultado cumulativo de processos de desenvolvimento que variam constantemente. O crescimento das árvores é fortemente influenciado pelo sítio e suas variações edafoclimáticas entre as unidades de manejo. Logo, a formação da madeira e sua qualidade são reflexos da interação entre o crescimento da árvore com o ambiente ao seu redor. Uma importante ferramenta para o gerenciamento dessa variabilidade é o inventário florestal (CAMPOS; LEITE, 2013), que é um monitoramento periódico das unidades de manejo, realizado por meio de delimitações de amostras que capturam de forma eficiente as mudanças nos talhões ao longo do tempo (SCOLFORO et al., 2017). Em um inventário florestal, quando se pretende obter informações dendrométricas e sobre a qualidade da madeira utiliza-se a técnica da cubagem rigorosa, que é baseada na medição sucessiva de diâmetros ao longo do fuste para obtenção do volume real da árvore, assim como coleta de discos na direção longitudinal - ao longo do fuste - para os parâmetros de qualidade da madeira; essas atividades geram aumento nos custos do inventário (LEITE; ANDRADE, 2002).

Modelos de regressão são usualmente desenvolvidos para estimar a densidade básica da madeira a partir de dados obtidos por amostragem destrutiva no inventário florestal. Por muitos anos, pesquisadores e gestores dos recursos florestais usam modelos estatísticos empíricos ou modelos matemáticos complexos para estimar com precisão a densidade básica (THIERSCH et al., 2006; RATURI et al., 2012; COUTO et al., 2013). Um fator importante ao desenvolver modelos para estimar a densidade básica é a definição de equações apropriadas para cada estrato, sendo este geralmente determinado pelas variáveis: material genético, espaçamento de plantio, classe de sítio e idade da floresta, sendo a partir daí, geradas equações específicas a serem atualizadas conforme o ingresso de novas variáveis. Com isso, empresas de grande porte mobilizam recursos humanos e gastam quantias consideráveis de recursos financeiros com a derrubada de árvores (LEITE; ANDRADE, 2002).

Em muitas ocasiões não é possível gerar equações para determinados estratos. No caso de plantios clonais, por exemplo, em que há frequentemente

substituição dos materiais genéticos originais por superiores (HAKAMADA; LEMOS, 2010), sempre há clones que não estão contemplados em todos os sítios, sendo necessário, nesses casos, aplicar equações de estratos semelhantes (CAMPOS; LEITE, 2013).

Ao longo dos anos as empresas do setor florestal tem acumulado grande quantidade de dados de densidade básica. Esses dados podem ser utilizados para implementar um projeto de redes neurais cujo objetivo final é a estimativa da densidade básica da madeira das árvores sem o uso de modelos de regressão. O potencial e a capacidade preditiva das redes possibilitam a obtenção de estimativas mais precisas e exatas na mensuração e manejo florestal, no geral, superiores aos métodos convencionais de regressão por serem capazes de generalizar o conhecimento oriundo de uma base de dados conhecida para dados desconhecidos de um mesmo tipo de problema.

Diante destas considerações, o objetivo deste estudo foi configurar, treinar e validar Redes Neurais Artificiais para estimativa da densidade básica da madeira de plantios florestais de *Eucalyptus* spp. utilizando-se informações históricas dos sítios e dos plantios levantadas nos inventários florestais pré-corte e contínuo.

REVISÃO DE LITERATURA

Produtividade e qualidade silvicultural em plantios de *Eucalyptus* spp.

A área mundial de florestas plantadas vem aumentando, anualmente, cerca de 4,63 milhões de hectares. Estima-se que cerca de 76% dessa área seja para produção florestal, sendo que o Brasil participa com 2,67% do total das plantações florestais mundiais (OLIVEIRA et al., 2016). Em muitas partes do mundo o *Eucalyptus* é um gênero dominante na indústria florestal, usado para a fabricação de uma grande variedade de produtos (BERNARD, 2003).

No Brasil, as florestas de *Eucalyptus* spp. ocupam 5,7 milhões de hectares, dos quais 24% estão em Minas Gerais e 17% em São Paulo (IBÁ, 2017). O estabelecimento do gênero *Eucalyptus* ocorreu principalmente devido à sua rápida taxa de crescimento, que é reconhecida como a mais alta do mundo entre as florestas de *hardwood*, e a sua adaptabilidade a uma ampla gama de sítios com distintas condições edafoclimáticas (MYBURG et al., 2014). Após a consolidação

dos programas de melhoramento genético nas décadas de 1980 e 1990, novas populações de cruzamentos interespecíficos, principalmente entre *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, destacam-se no cenário florestal brasileiro pela sua alta produtividade e adequada qualidade da madeira a diversos usos, com ciclos de colheita de 6 a 7 anos (BASSA et al., 2007; LEMOS, 2012). Clones de híbridos são mais vantajosos em relação às mudas de espécies puras originadas por sementes, porque podem combinar aspectos desejáveis na madeira à adaptabilidade do sítio (GONÇALVES et al., 2013), além da fixação de combinações entre genótipos de vigor híbrido, que permitem a obtenção de produtos florestais homogêneos (FONSECA et al., 2010).

A produtividade das florestas no Brasil vem crescendo ao longo dos anos devido à prática da silvicultura intensiva, que maximiza a expressão da qualidade do material genético e do potencial intrínseco do sítio (DEBELL et al., 2001; NILSSON; ALLEN, 2003; MAURI et al., 2015; DA SILVA et al., 2016). Hakamada e Lemos (2010) avaliaram a influência do manejo silvicultural e do melhoramento genético em plantações de *Eucalyptus* spp. no nordeste do estado de São Paulo e encontraram um incremento de cerca de 300% nas últimas três décadas. Segundo Campinhos (1999) na década de 1960 o incremento médio anual (IMA) de uma floresta de *Eucalyptus* spp. foi em média $12 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Atualmente, como enfatizado por Stape et al. (2010), a produção de *Eucalyptus* spp. aumentou dramaticamente, com o IMA na faixa de 20 a $60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Além disso, a seleção ótima de genótipos, de acordo com o ambiente, promove o aumento da produção sem necessariamente aumentar a área de plantio (MARCATTI et al., 2017), proporcionando melhor adequação dos planos de manejo florestal de acordo com a especificidade ecofisiológica de cada clone.

Além do potencial de ganho genético, ainda há espaço para ganho de produtividade por meio da adequação no fornecimento de recursos ao crescimento via atividades silviculturais (HAKAMADA et al., 2015). Segundo a ABRAF (2013), uma fração considerável do aumento da produtividade do eucalipto no Brasil ocorrido nos últimos 40 anos tem uma contribuição significativa do manejo silvicultural. Em um plantio clonal todas as plantas possuem a mesma capacidade de crescimento. Porém, o fornecimento parcial ou heterogêneo de recursos ao crescimento pode causar heterogeneidade entre árvores (BINKLEY et al., 2010). Neste aspecto, uma série de pesquisas têm sido desenvolvidas com a expectativa

de aumentar a produtividade da floresta - variando de 20% a 27% em média - apenas com melhorias na fertilização e com o controle de pragas e ervas daninhas (FERREIRA; STAPE, 2009; CARRERO et al., 2011; STAPE et al., 2006, HAKAMADA et al., 2015).

Efeitos do sítio na produtividade e na densidade básica da madeira

A qualidade intrínseca do sítio é fator decisivo tanto na produtividade florestal quanto na qualidade da madeira (STAPE et al., 2010). Ambas as variáveis estão relacionadas às propriedades do solo, que influenciam o suprimento de recursos de crescimento, como a água e os nutrientes para as árvores, e às propriedades que favorecem o crescimento do sistema radicular (BALIEIRO et al., 2008; CORRÊA NETO et al., 2007; REIS et al., 2006). Para Gonçalves e Mello (2000), os mecanismos e processos que permitem a uma planta lidar com o déficit de água severo e periódico no solo, envolvem uma compensação para a planta em termos de redução do potencial de crescimento. De forma geral, sítios que apresentam condições desfavoráveis ao crescimento das espécies florestais, normalmente caracterizados por deficiência hídrica, temperaturas extremas e solos de baixa fertilidade estão correlacionados com altas densidades da madeira. Por outro lado, baixas densidades estão associadas a condições ambientais favoráveis ao crescimento, com disponibilidade e boa distribuição hídrica, temperaturas mais elevadas e solos mais férteis (BAKER et al., 2004; MULLERLANDAU, 2004; ROQUE; TOMAZELLO FILHO, 2009).

Gava e Gonçalves (2008) estudaram o efeito das características do solo na produtividade de *Eucalyptus* spp. e observaram uma relação positiva entre o teor de argila no solo e a produtividade, principalmente devido à maior capacidade de retenção de água, característica dos solos argilosos. Correlações positivas entre produtividade florestal e teor de argila foram encontradas por diversos pesquisadores (BOWERSOX; WARD, 1972; BRAGA et al., 1995). Adicionalmente, Ralston (1964 e 1967) observou uma resposta relativamente curvilínea ao acréscimo dos teores de silte e argila em áreas com solos bem drenados e baixa capacidade de retenção de água, sendo que o crescimento das árvores se elevou com o aumento do teor de silte e argila devido a um suprimento mais favoráveis de água e

nutrientes até um limite em que o acréscimo de partículas finas comprometesse a aeração do solo.

Um dos principais fatores que reduzem o crescimento e o desenvolvimento de plantas é o *stress* por deficiência hídrica (SEGHATOLESLAMI et al., 2008). Segundo Stape et al. (2010) e Da Silva et al. (2016), a disponibilidade de água no solo é fator limitante da produtividade florestal. De acordo com Almeida et al. (2004) em plantios de *Eucalyptus* spp. cujo manejo é direcionado para curtas rotações (5 a 7 anos), basta um período seco durante sua rotação para diminuir drasticamente seu rendimento. Segundo Bergès et al. (2008), em ambientes favoráveis ao crescimento, nos quais a atividade fisiológica e cambial das plantas é plena, a divisão celular é mais intensa, não acompanhando espessamento proporcional da parede celular, proporcionando a formação de madeira de densidade básica mais baixa. Resultado semelhante também foi encontrado por Ribeiro e Zani Filho (1993) que, analisando variações edafoclimáticas entre regiões de amostragem concluíram que com melhores condições edafoclimáticas houve uma diminuição na densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*.

A temperatura condiciona mais o ritmo de crescimento das árvores em áreas de clima temperado do que em climas tropicais (JACOBY, 1989). No entanto, para Landsberg e Sands (2011), a temperatura está intimamente ligada aos processos metabólicos das plantas e, portanto, tem inquestionável impacto no crescimento, especialmente no balanço de carbono por meio de sua influência sobre a fotossíntese e a respiração celular.

Extremas temperaturas além de afetar o balanço hídrico da planta, perturbam os sistemas enzimáticos, induz o estresse hídrico e a perda de turgescência (LANDSBERG; SANDS, 2011). Segundo os mesmos autores, as temperaturas máxima e mínima podem causar danos às plantas e interromper o crescimento temporária ou permanentemente, sendo significativa fonte de estresse abiótico. Altas temperaturas podem reduzir a assimilação de carbono da planta, devido ao aumento da transpiração e ao fechamento dos estômatos. Por outro lado, em temperaturas baixas, tais como em dias com ocorrência de geadas, também ocorre redução da atividade fotossintética por certo período de tempo em consequência do congelamento das células (LARCHER, 2000). Temperaturas elevadas durante a estação de crescimento também são consideradas fatores limitantes, uma vez que estas podem limitar a produção de enzimas e hormônios que são necessários para

que determinados processos fisiológicos ocorram, além de, acentuar a perda de água pelas plantas, em uma época em que muitas vezes, esta já é escassa, afetando assim o crescimento (FRITTS, 1976).

Efeito do manejo florestal na produtividade e na densidade básica da madeira

A disponibilidade de recursos essenciais ao crescimento - água, luz e nutrientes - interferem diretamente na produtividade florestal. Estas variáveis maximizam a expressão da qualidade do material genético e também do potencial intrínseco do sítio (NILSSON; ALLEN, 2003; NYLAND, 2007). Pallett e Sale (2004) avaliaram o ganho relativo da silvicultura em povoamentos de *Eucalyptus grandis* na África do Sul. Os autores concluíram que o uso de corretas práticas de manejo, como o espaçamento, a fertilização e o adequado preparo de solo contribuíram com 78% de ganho relativo em produtividade. Os outros 22% foram atribuídos aos ganhos com o melhoramento genético. Gonçalves e Barros (1999), Gonçalves et al. (2004) e Gonçalves et al. (2008) relatam que a evolução da produtividade em florestas plantadas no Brasil e a sua sustentabilidade são resultados de corretas práticas na determinação de espaçamento, manejo de resíduos florestais, preparo e conservação de solo, fertilização adequada e controle de plantas daninhas.

O espaçamento afeta muito a produção; além disso, tem várias implicações em relação aos aspectos silviculturais, tecnológicos e econômicos, pois influencia o crescimento e a taxa de sobrevivência das árvores, qualidade da madeira, quantidade de casca, idade da colheita, processos de colheita e gerenciamento da floresta (LEITE et al., 1997; LELES et al., 2001; GONÇALVES et al., 2004).

Definir o espaçamento inicial para as plantações de *Eucalyptus* spp. é essencial porque determina a quantidade de recursos naturais disponíveis para o crescimento da árvore. Estudo realizado por DeBell et al. (2001) com *Eucalyptus saligna* de origem havaiana revelou que, o crescimento em diâmetro, logo, a produtividade, poderia aumentar substancialmente, tanto através da adubação com nitrogênio suplementar, quanto aumentando a área vital por planta, sem diminuir a densidade da madeira. Estes autores concluíram ainda que o crescimento rápido - seja como resultado de uma melhor nutrição ou aumento do espaçamento de plantio - resultaria em madeira com uma densidade ligeiramente maior e mais uniforme. Ribeiro et al. (2017), trabalhando com um híbrido entre *Eucalyptus grandis* x

Eucalyptus urophylla aos 72 meses de idade no Centro-Oeste do estado de São Paulo observaram o aumento na densidade básica com o aumento crescente do espaçamento, sendo observado uma tendência de estabilização a partir de 4,95m² por árvore. Moulin et al. (2017) encontraram resultados distintos para clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com idades de 6 e a 12 meses nos espaçamentos mais amplos, havendo interação entre clone e espaçamento em alguns casos. Nascimento et al. (2015) avaliando o efeito do espaçamento na densidade e retratibilidade de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em Montes Claros, MG observaram crescimento mais lento das árvores nos espaçamento mais adensado, produzindo madeiras 7% mais densas comparadas às cultivadas em espaçamento mais amplo.

Dentre as práticas de manejo, a disponibilidade de nutrientes é o recurso mais facilmente manipulado pelos silvicultores. Árvores sem nutrição equilibrada podem levar a uma população heterogênea, comprometendo a produtividade do sítio (HAKAMADA et al., 2015; SILVA et al., 2016). Diversos estudos destacam a importância do efeito da fertilização mineral nas propriedades anatômicas, físicas e mecânicas da madeira do gênero *Eucalyptus* (SETTE JR et al., 2013; CASTRO et al., 2017). Timander (2011) estudando o potencial de produção de *Eucalyptus urophylla* aos 68 meses em sete tratamentos de fertilização em Guangxi, no sul da China observou que a maior produção total e incremento médio ocorreram para o tratamento com máxima fertilização, porém, o valor de densidade básica da madeira foi significativamente menor em comparação com a madeira do tratamento controle. Sette Jr. et al. (2014) avaliando alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral aos 6 anos em Itatinga, no Oeste do estado de São Paulo, não observaram alterações significativas na densidade aparente média do lenho.

O aumento da uniformidade dentro do povoamento depende também das práticas eficazes de preparo de solo. Ao longo dos anos, as operações de silvicultura foram aprimoradas para se atingir um rigor experimental no quesito qualidade. De acordo com Hakamada (2012), as técnicas de preparo de solo evoluíram desde o modelo dos equipamentos até a profundidade de penetração no solo, primeiramente com grade *bedding*, seguido da utilização de hastes que passaram de uma profundidade média de 40 para 70 centímetros. Rocha et al. (2015) avaliando o crescimento de *Eucalyptus grandis* com diferentes métodos de

preparo de solo no Rio Grande do Sul observaram uma diferença significativa na mortalidade das plantas, com maior percentual para o coveamento manual quando comparado aos tratamentos mecanizados. Nilsson e Allen (2003) observaram que o preparo de solo de baixa intensidade apresentou maior coeficiente de variação de volume do caule e maior mortalidade de plantas.

O grande desafio de gestão florestal sob a variável densidade básica para o gênero *Eucalyptus* é separar os efeitos dos fatores ambientais, do manejo do sítio, e da hereditariedade genética nas características anatômicas da madeira. Se as reações do crescimento da planta às condições de crescimento local, fossem melhor compreendidas, não seria possível apenas fornecer uma base para determinar as melhores espécies para a plantação, mas também para prever a qualidade da madeira produzida.

Correlações entre variáveis do sítio e do plantio na densidade básica da madeira

Apesar da influência comprovada das variáveis de sítio na produtividade da floresta, Soares e Leite (2000) citam algumas dificuldades da utilização dessas variáveis em modelos de crescimento e produção como, por exemplo, problemas estatísticos relacionados à alta correlação entre as variáveis independentes do modelo e dificuldade na determinação das probabilidades de ocorrência de níveis das variáveis climáticas. Em contrapartida, não considerar os fatores climáticos pode causar interpretações erradas em relação ao crescimento final.

Assim como a produtividade, a densidade básica da madeira também recebe influência das variáveis de sítio e do plantio. Para compreender a relação destas variáveis e selecionar aquelas que melhor representam a densidade básica, técnicas de análise multivariada podem ser empregadas para reconhecer dentre as variáveis: clima, povoamento e manejo quais são as mais importantes e entender as associações que podem ocorrer simultaneamente entre estas variáveis de interesse.

O grau de associação entre características de um dado material pode ser avaliado de diversas formas. A análise de correlação canônica, sendo uma técnica de análise multivariada, permite correlacionar simultaneamente diversas variáveis dependentes e independentes (JOHNSON; WICHERN, 2007). A técnica de correlações canônicas é muito utilizada em estudos exploratórios com a finalidade

da simplificação estrutural dos dados em situações onde se dispõem de um grande número de variáveis, mas que podem estudar aquelas combinações lineares cuja correlação é mais elevada (TRUGILHO et al., 2003).

A correlação canônica constitui uma maneira simples de reduzir as complexidades envolvidas em relacionar dois conjuntos de variáveis, buscando a máxima correlação entre uma combinação linear de variáveis em um dos grupos com uma outra combinação linear das variáveis do outro grupo de variáveis (JOHNSON; WICHERN, 2007; MANLY, 2004), medindo basicamente o grau máximo de associação existente entre estes dois conjuntos.

O primeiro passo da análise de correlação canônica é obter uma ou mais funções canônicas, sendo que cada função consiste em um par de variáveis estatísticas, em que uma representa as variáveis independentes e a outra as dependentes. De acordo com Hair Junior et al. (2005), o número máximo de funções canônicas que podem ser extraídas dos conjuntos de variáveis é igual ao número de variáveis no menor conjunto de dados, independentes ou dependentes. Na decisão de quais funções canônicas devem ser interpretadas, três critérios são recomendados em conjunto um com o outro: significância estatística, magnitude das relações canônicas e medida de redundância de variância compartilhada (HAIR JUNIOR et al., 2005). A significância estatística normalmente utilizada é a estatística F, normalmente 0,05 ou mais, sendo baseada na premissa de que as variáveis em cada conjunto contribuem fortemente para as variâncias compartilhadas, de forma que essas funções são consideradas relacionadas umas com as outras. Na magnitude das relações canônicas, não há tamanhos adequados, a decisão é geralmente baseada na contribuição das descobertas que melhor compreendam o problema em estudo. A medida de redundância de variância compartilhada é utilizada para encontrar a quantia de variância compartilhada que pode ser explicada por cada variável canônica, assim como a magnitude das relações canônicas, não há um índice adequado e sim, um índice que consiga justificar a interpretação das variáveis.

Monitoramento do estoque de madeira no setor florestal

Com o objetivo de minimizar os impactos causados pelas variações nas características da madeira no processo fabril, indústrias do setor florestal fazem

avaliações regulares de suas florestas. O acompanhamento do crescimento de uma floresta ocorre por meio dos inventários florestais, que estimam a produção total de madeira existente em uma população florestal a partir de um processo de amostragem.

Há dois tipos principais de inventário florestal, o contínuo e o pré-corte. O inventário florestal contínuo (IFC) tem como objetivo estimar o estoque futuro do povoamento para geração de um planejamento de exploração de médio a longo prazo. Apesar do custo significativo de manutenção com o processamento dessas parcelas, elas não são suficientes para gerar uma estimativa precisa sobre o volume e sobre o erro do inventário por talhão na idade de corte (MELLO et al., 2009). Assim, há necessidade de se efetuar o inventário pré-corte (IPC) para se obter, de forma mais precisa estas informações. O IPC gera informações sobre o estoque atual para decisões a curto prazo. Esse inventário faz uso de um maior número de parcelas por talhão em relação ao IFC, agregando um novo componente ao custo do processo. Quando se pretende quantificar a produção florestal em massa de madeira - toneladas por hectare - torna-se necessário ainda, realizar a amostragem da densidade básica das árvores. Essa prática, um método destrutivo de análise, torna as atividades de inventário mais demoradas e custosas.

A existência de redes de inventário florestal que monitoram o estoque de madeira nos povoamentos é muito comum (CAMPOS; LEITE, 2013), porém, estas redes são geralmente subutilizadas como fonte de informações sobre qualidade da floresta (HAKAMADA et al., 2015) assim como da madeira. Reduzir o tempo e os custos envolvidos na caracterização da qualidade da madeira, especialmente a densidade básica, seria um obstáculo interessante a superar (COUTO et al., 2013).

Uma série de modelos lineares e não lineares foram desenvolvidos nos últimos 20 anos para inferir a densidade básica da madeira para o gênero *Eucalyptus* e eles se tornaram ferramentas úteis de gerenciamento (RAYMOND; MACDONALD; 1998; GANTZ, 2002; LIMA et al., 2007; THIERSCH et al., 2006; RATURI et al., 2012; COUTO et al., 2013). Grande parte dos modelos utilizam-se de resultados obtidos com métodos não destrutivos, como o resistógrafo e Pilodyn. Contudo, alguns pesquisadores, apesar de reconhecerem a economia de tempo, não recomendam o uso destas ferramentas para a medição da densidade na árvore individual (MUNERI; RAYMOND, 2000; CERALDI et al., 2001; MCKENZIE et al., 2003; WU et al., 2010; COUTO et al., 2013). Isso se deve ao fato de a correlação entre a penetração do

pino e a densidade básica da árvore inteira ter apresentado coeficientes fracos a moderados, tornando o método pouco seguro.

Uma abordagem que tem sido cada vez mais estudada é a inclusão de variáveis climáticas na construção dos modelos matemáticos para prever a produção de madeira. Segundo Campoe et al. (2016), compreender as relações entre o crescimento da floresta e as variáveis meteorológicas é útil e possui aplicações práticas, incluindo a otimização do zoneamento de espécies, a modelagem e a avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas espécies plantadas para fins de restauração ou produção de madeira.

O desenvolvimento de ferramentas que contabilizem os impactos da variação climática tem um grande potencial de uso no Brasil. Para Scolforo et al. (2017), o desenvolvimento de modelos que além de estimativas exatas, permitam aos gestores florestais avaliar o impacto das variações climáticas sobre a produtividade e a qualidade da madeira nos sítios, representa um grande avanço para o planejamento florestal. Desenvolver metodologias que permitam estimar com rapidez e exatidão a densidade da madeira – a chave do processo, altamente correlacionada aos fatores genéticos e as condições de sítio – têm sido um dos grandes desafios na biometria florestal.

Uma abordagem alternativa as técnicas de regressão utilizadas para estimar a densidade básica e suas interações genótipo x ambiente são as redes neurais artificiais (RNA), técnica que vem sendo utilizada com sucesso na mensuração florestal; disponibilizando estimativas tão precisas quanto aquelas feitas com uso de modelos de regressão ajustados por amostragem destrutiva.

Redes Neurais Artificiais - aplicação potencial na estimativa da densidade básica da madeira de plantios de *Eucalyptus* spp.

Uma rede neural artificial (RNA) é um sistema que tenta imitar o funcionamento das redes neurais biológicas do cérebro humano no reconhecimento, associação e generalização de padrões. O cérebro humano é muito eficiente no processamento de grandes quantidades de dados a partir de uma variedade de fontes diferentes, e na tomada de decisões em um ambiente complexo (CASTELLANOS et al., 2007). Como seres humanos aplicam os conhecimentos adquiridos com a experiência passada para novos problemas ou situações, uma rede neural leva exemplos

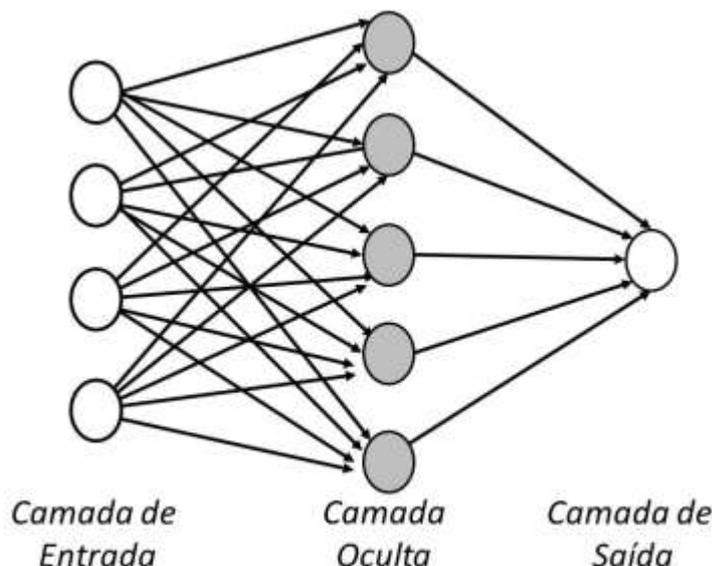
previamente resolvidos para construir um sistema de "neurônios" que faz com que uma nova decisão, classificação e previsão sejam realizadas com precisão e rapidez (VELLASCO, 2007).

A sua aplicação no manejo de florestas vem aprimorando técnicas de biometria e inventário florestal, permitindo maior acurácia na estimação da produção e dando maior suporte à tomada de decisão (CASTELLANOS et al., 2007; SILVA et al., 2009). As RNA são mais precisas do que outras técnicas estatísticas, particularmente quando o problema é mal definido ou mal interpretado e quando as observações do processo possam ser difíceis ou impossíveis de executar usando dados incompletos, como o efeito das variações edafoclimáticas no sítio e os fatores genéticos relacionados à herdabilidade da densidade básica (SANDO et al., 2005). As RNA são consideradas mais rápidas que outras técnicas, quando o problema é extremamente complexo e, a rede neural pode desenvolver o seu próprio esquema de ponderação com base nas relações entre as variáveis, reduzindo assim a exigência do modelador fornecer todas as informações conhecidas sobre um problema. A capacidade da rede para aprender relações complexas e a capacidade de incluir tanto dados quantitativos quanto qualitativos torna a abordagem de rede neural uma ferramenta muito flexível e poderosa. Além disso, pode ser facilmente implementada em softwares e em hardwares; possui tolerância a falhas devido ao elevado número de conexões entre os neurônios artificiais e também a capacidade de modelar diversas variáveis e suas relações não-lineares (PENG; WEN, 1999; BRAGA et al., 2000; HAYKIN, 2001; BINOTI et al., 2009).

Arquitetura e aprendizagem das Redes Neurais Artificiais

A arquitetura consiste na maneira como os neurônios estão estruturados e é determinante na capacidade de processamento de uma RNA. Usualmente as camadas são classificadas em três grupos: camada de entrada - onde as variáveis são apresentadas à rede; camada oculta - onde é realizada a maior parte do processamento; e camada de saída - onde o resultado final é concluído e apresentado (HAYKIN, 2001) (Figura 1).

Figura 1 – Modelo genérico de arquitetura de RNA, com uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída



A quantidade de neurônios nas camadas ocultas é geralmente definida empiricamente. Segundo Castro (2011) e Vellasco (2007), deve-se ter cuidado para não utilizar neurônios demais - o que pode levar a rede a memorizar os dados de treinamento (*overfitting*) - ao invés de extrair as características gerais que permitirão a generalização, nem um número muito pequeno (*underfitting*), que pode forçar a rede a gastar tempo em excesso tentando encontrar uma representação ótima.

Os principais modelos de RNA utilizados para fins de previsão de variáveis contínuas são as redes *Multilayer Perceptron* - MLP (HAYKIN, 2001). Neste tipo de rede, cada neurônio é conectado a todos os neurônios na camada subsequente, não havendo conexões entre neurônios da mesma camada. O modelo de cada neurônio de uma MLP inclui uma função de ativação linear ou não-linear. Segundo Vellasco (2007), esta não-linearidade é suave, ou seja, a função é diferenciável em qualquer ponto. Uma forma comumente utilizada de não linearidade que assume estas características em um intervalo contínuo de valores entre 0 e 1, é a função sigmoideal (BINOTI, 2010).

O processo de treinamento de uma rede compreende um algoritmo de aprendizado, capaz de reunir um conjunto de procedimentos para adaptar os parâmetros da RNA, de forma que a mesma possa aprender uma determinada tarefa (HAYKIN, 2001). O treinamento de uma rede neural é o ponto onde se obtém o sucesso ou o fracasso da rede (GUIMARÃES et al.,2007). Segundo Haykin (2001),

o processo de treinamento de uma rede MLP pelo método de aprendizado supervisionado – em que as entradas e saídas desejadas são fornecidas para a rede por um supervisor externo (usuário) – é realizado usualmente com o algoritmo de retropropagação do erro (*erro-backpropagation*). O algoritmo *backpropagation* é baseado na regra de aprendizagem por correção de erro, que consiste basicamente de dois passos, um para frente e outro para trás.

Segundo Haykin (2001), o passo para frente é chamado de propagação, onde os valores provindos dos neurônios da camada de entrada são aplicados aos neurônios ocultos e posteriormente suas saídas são aplicadas como entradas aos neurônios da camada de saída, obtendo a resposta da rede. Durante este passo os pesos sinápticos – forças de conexão entre neurônios - da rede são todos fixos. Estes pesos representam a “memória” da rede. Isto é, a experiência ganha como resultado das n apresentações dos padrões. São os pesos que combinam a não-linearidade para que a mesma fique distribuída pela rede (VELLASCO, 2007). O passo para trás é incumbido de ajustar os pesos sinápticos, por meio do cálculo do erro realizado na camada de saída, os pesos sinápticos entre as camadas antecessoras são ajustados de acordo com uma regra de correção de erro (HAYKIN, 2001).

A aplicação do erro pode ocorrer de duas maneiras, sequencial (padrão *standard*) ou por lote (*batch*). O algoritmo *backpropagation* corresponde ao modo de operação sequencial; a aplicação do erro por lotes corresponde ao algoritmo *resilient propagation*. Este último é considerado como um processo mais eficiente quando comparado ao *backpropagation* porque, segundo Riedmiller e Braun (1993), cada peso possui um valor de atualização individual, que é adaptável e evolui durante o processo de aprendizagem, baseado na função local da função de erro. Riedmiller e Braun (1993) explicam que estes pesos são ajustados para fazer com que a resposta real da rede se mova para mais perto da resposta desejada. Aplicações desenvolvidas na área florestal (BINOTI et al., 2014; MARTINS et al., 2016; LEITE et al., 2016) demonstram que o algoritmo *Resilient Propagation* tem resultados superiores aos dos demais algoritmos de treinamento para redes do tipo Multilayer Perceptron - MLP.

Aplicação das Redes Neurais Artificiais na área florestal

A aplicação de uma rede consiste no processo de generalização, que se trata da capacidade da rede em reconhecer com sucesso o ambiente que origina os dados e não propriamente os dados utilizados no treinamento, ou seja, utiliza-se a rede treinada para dar resposta a dados inéditos (VELLASCO, 2007).

Em particular, a abordagem das RNA mostra vantagens sobre abordagens de modelagem estatística tradicionalmente utilizada para estudar sistemas naturais, como previsão de chuvas, mapeamento de biomassa em florestas, classificação de imagens em sensoriamento remoto (SCHOENINGER et al., 2009; DIAMANTOPOULOU, 2012; YURTSEVEN; ZENGIN, 2013). Na área florestal, resultados satisfatórios têm sido obtidos ao empregar a técnica de RNA em substituição aos modelos de regressão (CASTELLANOS et al., 2007; BRAGA et al., 2000; DIAMANTOPOULOU, 2005; SILVA et al. 2009; LEITE et al., 2010). Mais recentemente, Castro et al. (2013), Binoti et al. (2014a, 2014b), Martins et al. (2016) utilizaram RNA para modelagem do crescimento individual de árvores de *Eucalyptus spp.* obtendo resultados precisos para diâmetro, altura e volume por hectare, possibilitando a redução dos custos para a construção das equações comumente utilizadas.

CAPÍTULO 1

CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro ^a; Sergio Augusto Rodrigues ^b;
Adriano Wagner Ballarin ^a

^a Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

^b Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

RESUMO

A análise de correlação canônica é um procedimento estatístico multivariado que mede a existência e a intensidade da associação entre dois grupos de variáveis. Neste capítulo, objetivou-se realizar a análise de correlação canônica para verificar as associações existentes entre o grupo formado pelas densidades básicas da madeira (determinadas com e sem casca) com o grupo formado pelos fatores edafoclimáticos que caracterizam os respectivos sítios: precipitação, temperatura e textura do solo e variáveis do povoamento: idade, material genético, rotação, diâmetro, altura, produtividade, área basal, área vital e as relações entre diâmetro-altura e área basal-número de fustes por hectare. Os dados do estudo são provenientes de uma empresa florestal com plantios de *Eucalyptus* spp. nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Foram analisadas as densidades básicas com e sem casca de 1.217 árvores - 21 materiais genéticos - em primeira e segunda rotação, com idade variando de 4 a 11 anos em cinco regiões edafoclimáticas distintas. As variáveis de sítio foram provenientes de medições obtidas por meio do inventário florestal. Para análise entre os grupos, foram avaliadas duas funções, sendo ambas significativas a 1% de probabilidade. Apenas a primeira função canônica apresentou alto R^2 canônico (0,762). Altas cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas positivas (associadas com maiores densidades básicas) foram obtidas para material genético, área vital, temperatura, e textura do solo. Tendência contrária (associada a menores densidades) foi observada para as variáveis: produtividade, área basal, rotação e precipitação. Os resultados mostraram a eficiência das correlações

canônicas na quantificação da associação entre esses grupos de variáveis, mas sobretudo na diferenciação dos efeitos das variáveis originais (sítio e manejo do plantio) na densidade básica da madeira.

Palavras-chave: análise multivariada; análise de correlações canônicas, variáveis climáticas; *Eucalyptus* spp.

CANONICAL CORRELATIONS BETWEEN SITE AND PLANT VARIABLES AND THE WOOD BASIC SPECIFIC GRAVITY OF *Eucalyptus* spp.

ABSTRACT

The canonical correlation analysis is a multivariate statistical procedure that measures the existence and intensity of the association between two groups of variables. In this chapter, we performed the canonical correlation analysis to verify the associations between the group formed by the wood basic specific gravity and the group formed by the edaphoclimatic factors that characterize the respective sites: precipitation, temperature and soil texture and population variables: age, genetic material, rotation, diameter, height, productivity, basal area, vital area and the relationships between diameter-height and basal area - number of stems per hectare. The data from the study come from a forest company with plantations of *Eucalyptus* spp. in the states of São Paulo and Minas Gerais. The basic specific gravities (evaluated in disks with and without bark) of 1,217 trees - 21 genetic materials - were analyzed in first and second rotation, with ages varying from 4 to 11 years in five distinct edaphoclimatic regions. The site variables were derived from measurements obtained through the forest inventory. For analysis between groups, two functions were tested, both of which were significant at 1% probability. Only the first canonical function showed a high canonical R^2 (0.762). High canonical loads and positive canonical cross loads (associated with higher basic densities) were obtained for genetic material, vital area, temperature, and soil texture. Contrary tendency (associated with lower densities) was observed for the variables: productivity, basal area, rotation and precipitation. The results showed the efficiency of the canonical correlations in the quantification of the association between these groups of

variables, but mainly in the differentiation of the effects of the original variables (site and planting management) on the wood basic specific gravity.

Keywords: multivariate analysis; canonical correlation analysis, climatic variables; *Eucalyptus* spp.

1.1 INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os principais produtores de celulose, papel e painéis de madeira no mundo, reflexo da alta produtividade de suas áreas plantadas e da excelência de seu parque industrial nessa área. O setor brasileiro apresenta a maior produtividade ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) e a menor rotação do mundo, que equivale ao tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores (IBÁ, 2017). De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2017), os 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, respondem por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e geram 6,2% do PIB industrial no País. Esses altos índices resultam tanto das condições de clima e solo quanto dos investimentos contínuos das empresas do setor no Brasil para aprimorar o manejo florestal.

Condições climáticas influenciam a variabilidade da madeira, uma vez que afetam a taxa de crescimento das espécies florestais, em razão da maior ou menor disponibilidade de calor, luz, água, elementos e compostos (FERREIRA, 2009; GOUVEA et al., 2012; OBERHUBER et al., 2014). As propriedades do solo influenciam no suprimento de recursos de crescimento para as árvores, como água e nutrientes, logo, estão relacionadas à produtividade dos plantios florestais (BALIEIRO et al., 2008; CORRÊA NETO et al., 2007; REIS et al., 2006).

De forma complementar, o manejo silvicultural é uma técnica com a função de aumentar a disponibilidade dos recursos de crescimento, como água, luz e nutrientes (NYLAND, 2007), de acordo com a necessidade de cada material genético. Dentre os avanços nos sistemas silviculturais, as melhores práticas desenvolvidas foram no controle de ervas daninhas, no preparo de solo, na fertilização e no ajuste do espaçamento (NILSSON; ALLEN, 2003; ORLANDER et al., 2002; NILSSON et al., 2002; SILVA, 2006; LITTLE et al., 2003).

A interação entre genótipo x ambiente tem sido utilizada na seleção de materiais genéticos promissores, sendo os clones avaliados em diferentes

ambientes com o intuito de avaliar possíveis ganhos na homogeneidade da madeira e nos padrões de produtividade (ROSADO et al., 2012). Sendo a madeira o resultado da combinação da quantidade e da distribuição dos diferentes elementos anatômicos e suas inter-relações com os fatores externos que tangem sobre ela, estudar a associação destas variáveis na formação da madeira, isoladamente, permitem tomar decisões mais assertivas quanto ao manejo silvicultural adequado, proporcionando ganhos em produtividade e qualidade da madeira.

A avaliação do grau de associação ou relacionamento entre características de um dado material pode ser feita de várias formas. As análises de correlação e de regressão são exemplos típicos de metodologias para a avaliação da interdependência ou da dependência, respectivamente (TRUGILHO et al., 2003).

A análise de correlação canônica, de acordo com Abreu e Vetter (1978) é um procedimento estatístico multivariado que permite diagnosticar a estrutura de relações existente entre dois grupos ou conjuntos de variáveis (X e Y). Mede a existência e a intensidade da associação entre os dois grupos de variáveis e constitui uma maneira simples de reduzir as complexidades envolvidas em relacionar dois conjuntos de variáveis (TRUGILHO et al., 2003). Com ela pode-se estimar a máxima correlação entre dois conjuntos complexos de variáveis, compostos por combinações lineares dos vários caracteres que os constituem - variáveis originais -, sendo muito utilizada em estudos exploratórios com grande número de variáveis, mas que podem estudar aquelas combinações lineares cuja correlação é mais elevada (CRUZ; REGAZZI, 1997; SILVA et al., 2007).

Este capítulo tem como objetivo avaliar a correlação canônica existente entre o grupo de variáveis edafoclimáticas, de manejo e dendrométricas obtidas por meio de inventário florestal com a propriedade densidade básica da madeira, avaliada com e sem casca em plantios de *Eucalyptus* spp., visando verificar as associações e a interdependência entre os grupos de variáveis estudadas.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Material experimental

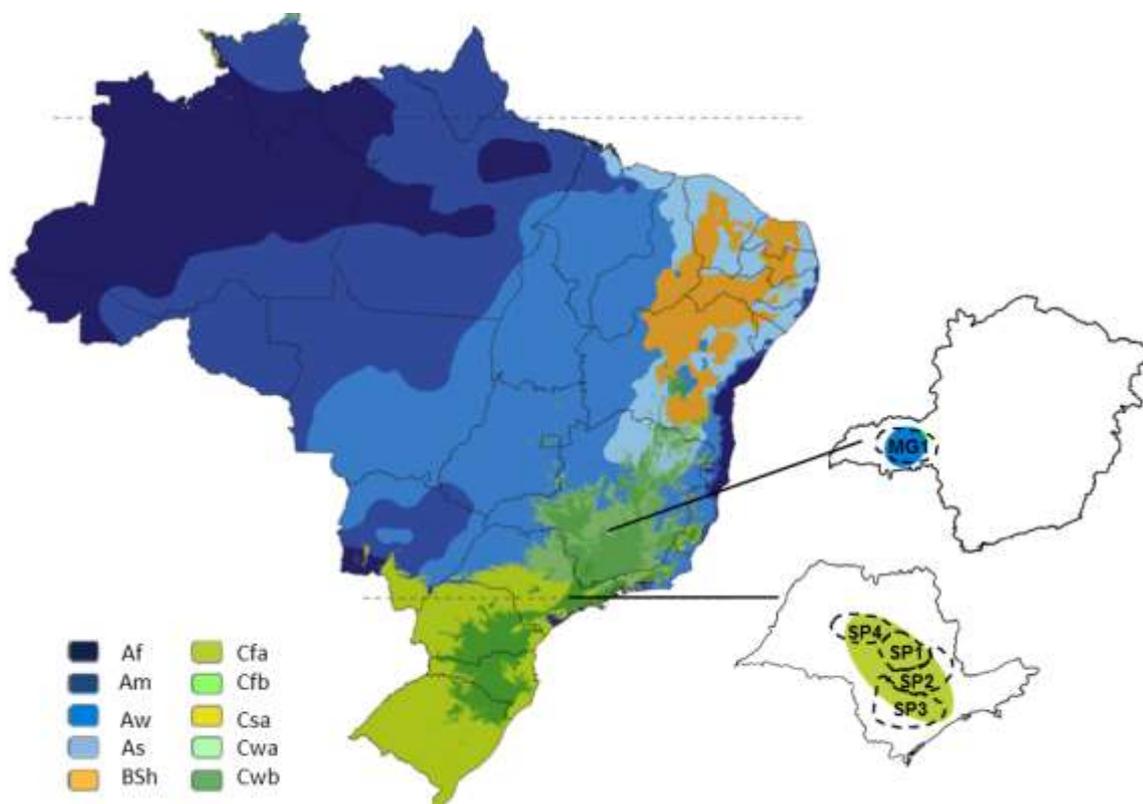
Os dados utilizados neste estudo são pertencentes a uma empresa florestal cujos plantios de *Eucalyptus* spp. estão localizados aleatoriamente em cinco regiões

edafoclimáticas distintas, nos estados de São Paulo (SP1, SP2, SP3 e SP4) e Minas Gerais (MG1). Na área do estudo, foram amostradas 936 árvores de 21 materiais genéticos, sendo 11 clonais e 10 seminais, sendo 602 árvores em primeira e 334 em segunda rotação, com idade variando de 4 a 11 anos. As árvores amostradas estavam distribuídas em 100 unidades de manejo (quadras), com 12 espaçamentos de plantio distintos, que possuem área vital disponível variando de 4,0 a 9,0 m² por árvore.

1.2.2 Características analisadas do sítio e do plantio

Nas regiões pertencentes ao estudo, de acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante é o Cfa (clima temperado úmido com verão quente) nas regiões SP1, SP2 e SP3 (40% da área) e Aw (tropical com estação seca no inverno) nas áreas que abrangem as regiões SP4 e MG1 (60% da área) (Figura 1.1).

Figura 1.1 – Mapa das regiões climáticas (Köppen) brasileiras e regiões de coleta dos dados: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4.



(ALVARES et al., 2014) adaptado pelo autor.

As informações de temperatura foram obtidas a partir de base histórica por município disponibilizada pela empresa proprietária dos plantios. Informações de precipitação anual acumulada contemplam o período de 2006 a 2013 para o estado de São Paulo e de 2002 a 2013 para Minas Gerais. Os solos predominantes nas regiões do estado de São Paulo são Latossolos seguidos por Argissolos, Neossolos e Nitossolos, com textura variando de arenosa a muito argilosa dependendo da região (Tabela 1.1). Em Minas Gerais há predominância dos Latossolos com textura muito argilosa. Parte dos dados de classificação pedológica foi disponibilizada pela empresa, os dados faltantes foram caracterizados de acordo com a coordenada geográfica e o mapa pedológico (OLIVEIRA et al., 1999).

Tabela 1.1 – Características edafoclimáticas das cinco regiões de estudo

Região	Clima	Classe de Solo	Textura do Solo	Precipitação Anual Acumulada (mm)	Temperatura Anual Média (°C)
SP1	Cfa	Latossolo	arenosa	1.464	20,4
			argilosa	1.488	20,5
			média	1.460	20,4
		Nitossolo	argilosa	1.452	20,3
Média SP1				1.467	20,4
SP2	Cfa	Latossolo	arenosa	1.501	19,2
			argilosa	1.428	19,9
			média	1.527	19,4
		Neossolo	arenosa	1.466	19,2
Média SP2				1.500	19,3
SP3	Cfa	Argissolo	arenosa	1.381	19,9
			argilosa	1.381	19,9
		Latossolo	argilosa	1.379	19,9
			média	1.338	18,9
Média SP3				1.367	19,6
SP4	Aw	Argissolo	média	1.363	20,7
		Latossolo	média	1.393	20,7
Média SP4				1.377	20,7
MG1	Aw	Latossolo	muito argilosa	1.412	21,4

As informações de densidade básica da madeira com e sem casca para cada material genético nas diferentes regiões edafoclimáticas são provenientes de dados históricos da empresa proprietária dos plantios. As informações dendrométricas utilizadas no processamento são provenientes da rede de parcelas de inventário florestal da empresa, cujas medições foram realizadas entre os anos de 2007 a 2013. As variáveis utilizadas para análise foram a produtividade ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$), área vital ($\text{m}^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$), área basal ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), dap - diâmetro a 1,30m do solo – (cm), altura (m), relação dap-altura, relação área basal-número fustes por hectare.

1.2.3 Correlações canônicas

O conjunto de dados normalizados com 936 observações simultâneas das 15 variáveis consideradas neste estudo foram reagrupadas em dois grupos: um grupo composto pelas variáveis de densidade da madeira com e sem casca e outro composto por variáveis caracterizando as unidades quanto ao material genético, textura, área vital, rotação, idade, precipitação e temperatura média, produtividade, altura, dap, área basal, relação entre diâmetro e altura (rel-dap-h) e relação entre área basal e número de fustes por hectare (rel-ab-fuste). Assim, considerou-se a divisão do vetor aleatório \mathbf{X} , com 15 variáveis, em dois conjuntos de vetores aleatórios da forma $\mathbf{X}' = [\mathbf{X}'^{(1)} \quad \mathbf{X}'^{(2)}]$, sendo $\mathbf{X}'^{(1)}$ o vetor com as duas variáveis de densidade da madeira e $\mathbf{X}'^{(2)}$ com as demais variáveis.

A avaliação de caráter exploratório das associações entre os dois grupos de variáveis foi realizada por meio do procedimento estatístico multivariado de correlação canônica, o qual considera a estrutura de variação total dos dados. Desta forma, para medir o grau de associação entre os dois grupos, os mesmos foram resumidos em combinações lineares de suas respectivas variáveis ($v_t = b'_t \mathbf{X}'^{(1)}$ e $u_t = a'_t \mathbf{X}'^{(2)}$, com t igual a um ou dois), resultando em novas variáveis chamadas de variáveis canônicas (v_t e u_t) e possibilitando a obtenção dos coeficientes de correlação canônicos e das respectivas cargas canônicas (JOHNSON; WICHERN, 2007). Foi utilizado o software livre R-Gui para obtenção dos resultados, considerando um nível de 5% para significância estatística das correlações canônicas (R CORE TEAM..., 2017).

1.3 RESULTADOS

1.3.1 Características analisadas

A Tabela 1.2 apresenta os valores médios de algumas das variáveis analisadas no estudo, agrupadas por região e textura do solo. As variáveis textura do solo e material genético, por se tratarem de variáveis categóricas, foram ordenadas em escala ordinal, sendo considerado para textura: 1 - arenosa, 2 - média, 3 - argilosa e 4 - muito argilosa e, para material genético: 1 para o material com reduzida

densidade básica e 24 para o material com elevada densidade básica, tanto com quanto sem casca. A literatura apresenta resultados controversos sobre a correlação entre o crescimento das árvores e a densidade básica da madeira. A maioria dos autores defende que em sítios favoráveis, quanto maior é a taxa de crescimento das árvores e a produtividade da floresta, menor será a densidade básica da madeira; ou seja, há uma correlação negativa entre densidade e incremento (MALAN, 1991; RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993; BOWYER et al., 2003; FERNANDES et al., 2011; MENESES, 2013), principalmente para os plantios seminais. Para plantios clonais, existem híbridos de alta produção volumétrica com também altas densidades, resultado dos programas intensivos de melhoramento genético (COSTA et al., 2007).

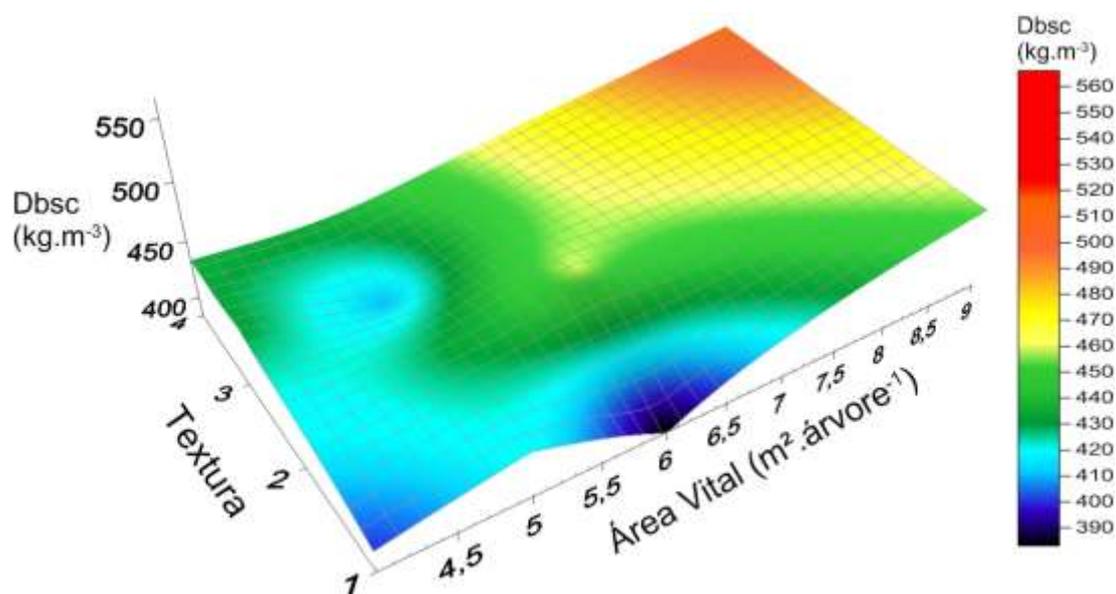
Tabela 1.2 – Valores médios das variáveis analisadas por região edafoclimática

Região	Textura	precip- media	temp- media	dap	altura	area- basal	area- vital	produt	Ida- de	rel- dap- h	rel- ab- fuste	Db cc	Db sc
SP1	arenosa	1.453	20	15	24	28	6,0	54	6	0,61	0,01	409	423
	argilosa	1.472	20	16	26	29	6,0	63	6	0,59	0,02	410	425
	média	1.460	20	15	25	26	6,0	54	6	0,61	0,01	412	428
Média SP1		1.465	20	15	26	28	6,0	59	6	0,60	0,01	410	425
SP2	arenosa	1.489	19	15	25	28	5,8	51	6	0,58	0,01	406	421
	argilosa	1.428	20	14	22	28	6,0	54	6	0,64	0,01	430	445
	média	1.527	19	14	23	29	6,0	56	6	0,64	0,01	407	423
Média SP2		1.500	19	15	24	28	5,9	53	6	0,61	0,01	408	423
SP3	arenosa	1.381	20	14	23	32	4,0	62	6	0,60	0,01	387	399
	argilosa	1.376	20	14	24	26	4,7	52	6	0,60	0,01	409	422
Média SP3		1.377	20	14	24	28	4,5	55	6	0,60	0,01	402	415
SP4	média	1.390	21	15	25	24	5,8	54	5	0,58	0,01	464	488
MG1	muito argilosa	1.417	21	17	28	25	9,0	44	8	0,62	0,02	481	509

precip-media: precipitação anual acumulada (mm); temp-media: temperatura anual média (°C); dap: diâmetro a 1,30m do solo (cm); altura (m); area-basal (m².ha⁻¹); produt: produtividade (m³.ha.⁻¹.ano⁻¹); rel-dap-h: relação entre dap e altura; rel-ab-fuste: relação entre área basal e número de fustes por hectare; Dbcc: densidade básica média com casca (kg.m⁻³), Dbsc: densidade básica média sem casca (kg.m⁻³).

A Figura 1.2 se observa a associação da densidade básica da madeira com a textura do solo e o espaçamento entre árvores, representado pela área vital (m².árvore⁻¹). Densidades básicas mais altas convergem para os espaçamentos mais amplos a medida que os teores de argila no solo são incrementados. A textura do solo, segundo Braga et al. (1995), é considerada o atributo de maior importância para explicar o potencial produtivo.

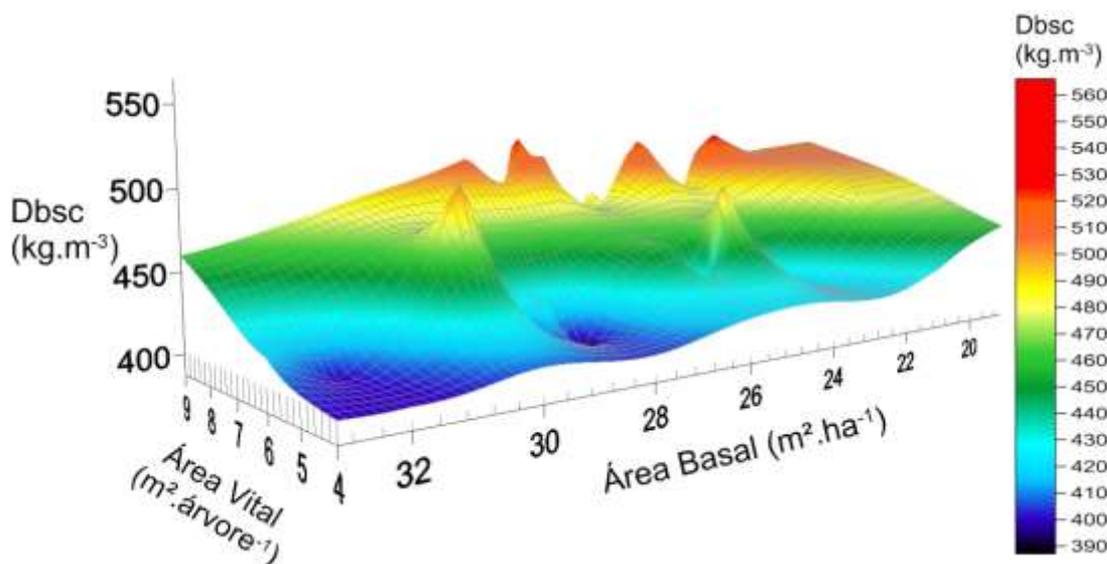
Figura 1.2 – Associação entre densidade básica da madeira sem casca - Dbsc, textura do solo e área vital ($\text{m}^2\cdot\text{árvore}^{-1}$) para os dados analisados



em que, Textura do Solo: 1 - arenosa, 2 - média, 3 - argilosa e 4 - muito argilosa

Na Figura 1.3 observa-se a associação entre o crescimento da floresta em área basal por hectare e o espaçamento entre árvores, representado pela área vital ($\text{m}^2\cdot\text{árvore}^{-1}$). A tendência observada é de maiores espaçamentos estarem correlacionados a densidades básicas mais altas com o decréscimo na produção em área basal por hectare.

Figura 1.3 – Associação entre densidade básica da madeira sem casca - Dbsc ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), área vital ($\text{m}^2\cdot\text{árvore}^{-1}$) e área basal ($\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$) para os dados analisados



1.3.2 Correlações canônicas

Na Tabela 1.3 estão apresentadas as correlações canônicas obtidas, o R^2 canônico e o teste de significância realizado. O coeficiente de correlação canônica mede a força da associação geral entre os dois conjuntos de variáveis. O R^2 canônico (raízes canônicas ou autovalores) fornece uma estimativa da quantidade de variância compartilhada entre as respectivas variáveis canônicas.

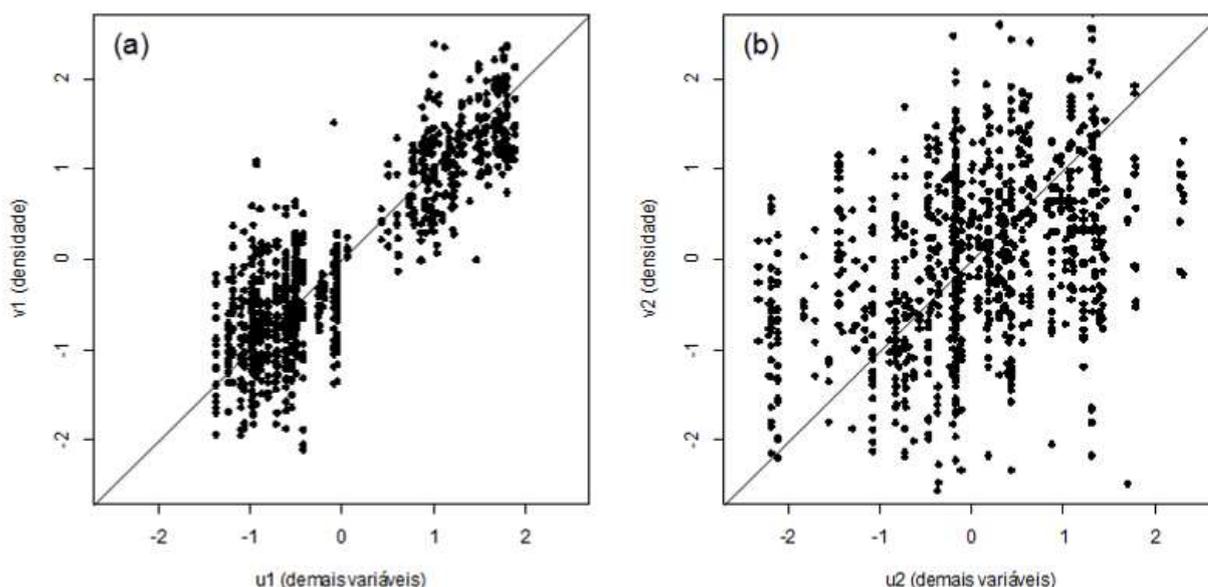
As correlações das duas funções canônicas mostraram-se significativas a 1% de probabilidade. No entanto, verifica-se que a correlação canônica 1 é superior à 2, por apresentar maior correlação e R^2 canônico. O R^2 da função 1 foi alto, a quantidade de variância do problema explicada pela função 1 foi 76,2% expressiva para os grupos de características analisadas.

Tabela 1.3 – Coeficientes das funções canônicas, correlação canônica entre as variáveis de perfil (u_t), densidade (v_t), autovalor e resultado do teste estatístico de significância da correlação

Variáveis canônicas	Variáveis originais	Coeficientes das funções canônicas	
		1ª (u_1, v_1)	2ª (u_2, v_2)
Densidade básica v_t	Dbcc	-2,05	-12,70
	Dbsc	3,03	12,50
Perfil u_t	matgen	0,631	-0,718
	textura	0,051	-0,285
	area-vital	0,314	1,440
	rotacao	-0,002	-0,160
	idade	-0,028	-1,159
	precip-media	-0,071	0,232
	temp-media	-0,007	0,257
	produit	-0,134	0,055
	altura	0,396	-0,923
	dap	-0,156	1,037
	area-basal	0,002	0,039
	rel-dap-h	0,099	-0,579
	rel-ab-fuste	-0,177	0,015
Correlação Canônica (r_{u_t, v_t})		0,873	0,413
R^2 canônico (autovalor)		0,762	0,171
Estatística Teste		1503,6	173,4
GL		26	12
Valor p		< 0,001	< 0,001

Os gráficos de dispersão de escores (Figura 1.4), corroboram a superioridade da função 1 (gráfico a) que apresenta forte associação linear entre as variáveis canônicas u_1 e v_1 .

Figura 1.4 – Gráfico de dispersão dos escores padronizados de cada par de variáveis canônicas



Na Tabela 1.4 são apresentadas as cargas canônicas e as cargas canônicas cruzadas determinadas para a função canônica 1, que apresentou a correlação canônica mais elevada.

Tabela 1.4 – Cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas do primeiro par de variáveis (u_1, v_1)

Variáveis canônicas	Variáveis originais	Cargas Canônicas	Cargas Canônicas Cruzadas	Variância compartilhada	Índice de redundância
Variáveis de densidade					
Densidade básica	Dbcc	0,9719186	0,8483418	0,960	0,731
v_1	Dbcc	0,9872719	0,8617429		
Variáveis de perfil					
Perfil u_1	matgen	0,93920312	0,81978595	0,385	0,293
	textura	0,76631131	0,66887688		
	area-vital	0,87283188	0,76185364		
	rotacao	-0,49843538	-0,43506065		
	idade	0,52893106	0,46167889		
	precip-media	-0,34042683	-0,29714246		
	temp-media	0,83098392	0,72532653		
	produz	-0,54282180	-0,47380345		
	altura	0,50005297	0,43647257		
	dap	0,55824510	0,48726573		
	area-basal	-0,51449571	-0,44907896		
	rel-dap-h	0,07257089	0,06334369		
rel-ab-fuste	0,55567414	0,48502165			

As cargas canônicas quantificam a correlação linear entre uma variável original e a variável estatística canônica do seu grupo (HAIR JUNIOR et al., 2005). Quanto

maior a carga, mais importante é a variável para derivar a variável estatística canônica. As cargas canônicas cruzadas quantificam a correlação entre uma variável original e a variável canônica do outro grupo. A variância compartilhada indica a quantidade de variância do conjunto de variáveis originais explicada pela respectiva variável canônica. O índice de redundância indica a quantidade da variabilidade de uma variável canônica explicada pela outra.

1.4 DISCUSSÃO

1.4.1 Relação entre as variáveis analisadas

Os fatores ambientais atuam de forma direta no crescimento das plantas, afetando os processos fisiológicos. Enumerar estes fatores é relativamente simples. Compreender como eles atuam e de que forma estão inter-relacionados em condições operacionais - não controladas - é uma abordagem relativamente complexa (BINKLEY et al., 2017).

As diferenças climáticas em cada região são fatores condicionantes do crescimento da floresta. Na Tabela 1.2, pode se observar que as variáveis edafoclimáticas influenciaram as taxas de crescimento de forma distinta, com tendência ora positiva, ora negativa; esse comportamento já era esperado (WOOLLONS et al., 1997; BERGH et al., 1998; YEH et al., 2000; RIGATTO et al., 2004; BINKLEY et al., 2017). Maiores produtividades foram encontradas nas regiões com maior precipitação anual acumulada, proporcionando o desenvolvimento de madeiras com densidade básica média mais baixa - Região SP1 argilosa. Segundo Bergès et al. (2008), ambientes favoráveis ao crescimento, nos quais a atividade fisiológica e cambial das plantas é plena, resultam em divisão celular mais intensa, geralmente não acompanhada de um espessamento proporcional da parede celular. Sendo assim, regiões que apresentavam maior potencial de crescimento (produtividade mais alta) corresponderam ao desenvolvimento de florestas com baixa densidade básica. Resultados semelhantes foram obtidos por Leal et al. (2004), Reis et al. (2006), Souza et al. (2006), Seghatoleslami et al. (2008), Sette Jr. et al. (2010); que constataram a influencia da precipitação no crescimento das florestas e conseqüentemente na formação da madeira e sua densidade.

Os dados de séries históricas de precipitação de 2007 a 2013 (Tabela 1.1) indicam que as regiões SP2 e SP1 apresentaram em média os maiores índices de precipitação, seguidas das regiões MG1, SP4 e SP3. Analisando isoladamente a densidade básica em função da precipitação observa-se uma tendência negativa; onde a maior disponibilidade de água no solo aumentou as condições favoráveis ao crescimento da planta - que tendem a apresentar maior porcentagem de vasos de maiores diâmetros - proporcionou a formação de madeira com densidade básica mais baixa.

A temperatura tem influência indireta no crescimento das plantas e ocorre numa grande amplitude, porém nessa faixa, existe uma considerada ótima, que é variável entre espécies e cultivares, de acordo com a idade e fase de desenvolvimento da planta (CAMPOS, 1970; MEURER, 2007; BINKLEY et al., 2017). Na Tabela 1.2 foram observados maiores valores de densidade básica nas regiões com temperatura anual média mais elevada. É razoável supor que as temperaturas elevadas do verão causam uma rápida evapotranspiração, a qual reduz drasticamente o armazenamento de água no solo e leva a árvore à condição de *stress*, limitando o crescimento e proporcionando uma mudança na espessura da parede celular (TROVATI; FERRAZ, 1984). Muller-Landau (2004) e Bergès et al. (2008) também observaram árvores crescendo em clima tropical seco produzem madeira de maior densidade do que aquelas de clima tropical úmido.

O tipo de solo e suas classes texturais são fatores que afetam diretamente o crescimento das árvores, sendo a textura classificada como o atributo mais importante para explicar a capacidade produtiva do solo (BRAGA et al., 1995). Na Figura 1.2 observa-se que com o incremento em área vital foi observado um aumento na densidade básica sem casca em todas as texturas. Os solos com textura arenosa resultaram em menores densidades básicas da madeira sem casca para todas as áreas vitais. Nota-se ainda que para uma mesma área vital, maiores foram os valores de densidade básica nos solos de textura muito argilosa. A região MG1 - textura muito argilosa - cujo solo tem maior capacidade de retenção de água disponível, apresentou os maiores valores de densidade básica sem casca. A estrutura do solo pode influenciar o crescimento das árvores por meio da capacidade de infiltração da água, aeração do solo e pela predisposição à penetração das raízes (MEURER, 2007).

Com relação à área vital disponível por árvore - considerada como a variável ambiental de efeito imediato nos acréscimos de área basal e, conseqüentemente, em aumentos volumétricos - a Figura 1.3 ilustra a resposta positiva do aumento na densidade com a ampliação da área vital e redução da área basal. Para uma mesma área basal se observa maiores densidade básicas sem casca com o incremento da área vital. Para uma mesma área vital se observa maiores densidade básicas sem casca com menor produção em área basal. Nota-se ainda que densidades básicas acima de 500 kg.m^{-3} (identificados na legenda pelas cores laranja a vermelho) ocorreram apenas para povoamentos com área vital superior a $7,5 \text{ m}^2.\text{árvore}^{-1}$ e produtividade em área basal menor do que $31 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$. De acordo com Leite et al. (1997); Leles et al. (2001) e Gonçalves et al. (2004), Ribeiro et al. (2017) a área vital afeta muito a produção, além disso, tem várias implicações em relação aos aspectos silviculturais, tecnológicos e econômicos, pois influencia o crescimento e a taxa de sobrevivência das árvores, qualidade da madeira, quantidade de casca, idade da colheita, processos de colheita e gerenciamento da floresta.

1.4.2 Correlações canônicas

Na Tabela 1.3, observam-se os coeficientes de correlação canônica bem como os coeficientes das funções canônicas (v_t e u_t). O coeficiente de correlação canônica mais expressivo ($r = 0,873$) indica que os valores da função (u_1) e da função (v_1) são diretamente proporcionais.

Os resultados da Tabela 1.4 permitem diferenciar os efeitos das variáveis originais da função canônica (u_1), tanto em termos da sua correlação com a própria função (carga canônica) quanto em termos da sua correlação com a outra função canônica (v_1), relativa à densidade básica (carga canônica cruzada), ou seja, quando as variáveis originais material genético (mat-gen), área-vital e altura têm valores elevados e produtividade (produz), diâmetro (dap) e relação área basal-número de fustes por hectare (rel-ab-fuste) tem valores baixos, maiores serão as densidades básicas da madeira – com e sem casca.

As variáveis originais que mais se associaram as maiores densidade básicas foram, em ordem decrescente material genético (matgen), área vital, temperatura anual média (temp-media) e textura do solo. Resultados semelhantes foram

encontrados por Berger (2000) avaliando o efeito do espaçamento e da fertilização na densidade básica de *Eucalyptus saligna* e por Ribeiro et al. (2017) estudando a densidade básica em clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, em que maiores espaçamentos de plantio proporcionam a formação de madeira de densidade básica mais elevada. Contrariamente, as que se associaram a menores densidades básicas foram, em ordem decrescente de importância, produtividade, área basal, rotação e precipitação anual acumulada (precip-media). Ressalta-se que, novamente aqui, mesmo com cômputo de plantios clonais híbridos, a produtividade compromete a densidade básica. Estes resultados estão de acordo com a literatura, onde os índices de precipitação e produtividade mais elevados são características dos sítios com características edafoclimáticas favoráveis, proporcionam a formação de madeira com densidade básica mais baixa (SEGHATOLESLAMI et al., 2008; SETTE Jr. et al., 2010).

O índice de redundância (Tabela 1.4) indicou que 73,1% da variabilidade das densidades básicas com e sem casca é explicada pela função canônica u_1 . Quanto ao índice de variância compartilhada, 96% da variabilidade das densidades básicas é explicada por v_1 . Pode se afirmar, assim, que as variáveis originais da função canônica (u_1) conseguiram expressar, com seus valores, boa parte da variância observada para a densidade básica.

1.5 CONCLUSÃO

As variáveis originais que apresentaram as maiores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas – estando assim associadas às maiores densidades básicas com e sem casca - foram material genético, área vital, temperatura média anual e textura do solo. Inversamente, as menores densidades básicas com e sem casca apresentaram-se associadas às menores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas, que foram atribuídas às variáveis produtividade, área basal, rotação e precipitação anual acumulada.

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de utilização dessa técnica de análise multivariada para realizar inferências a respeito de variáveis dendrométricas do plantio e do sítio na densidade básica da madeira de *Eucalyptus*

spp. Permitiram, também, diferenciar os efeitos das variáveis originais (plantio e sítio) na densidade básica da madeira.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, G., LEONARDO, J., SPAROVEK, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.

ABREU, M. A.; VETTER, D. 1978. A análise de relações entre conjuntos de variáveis na matriz geográfica: correlação canônica. *In: FAISSOL, S. Tendências atuais na geografia urbano/ regional: teorização e quantificação*. Rio de Janeiro: IBGE. p. 133-144.

BALIEIRO FC, OLIVEIRA WC, PEREIRA MG, ANJOS LHC, PICCOLO MC, JACCOUD CF. 2008. Fertilidade e carbono do solo e uso da água pelo eucalipto numa topossequência em Seropédica, RJ. *Revista Árvore*, 32(1): 153-162.

BERGH, J.; MCCMURTRIE, R. E.; LINDER, S. 1998. Climatic factors controlling the productivity of Norway spruce: A model-based analysis. *Forest Ecology and Management*, Amsterdã, v.110, n.2, p.127-139.

BERGER, R. 2000. *Crescimento e qualidade da madeira de um clone de Eucalyptus saligna Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização*. 106 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BERGÈS, L.; NEPVEU, G.; FRANC, A., 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, 255 (3/4), 567-579.

BINKLEY, D., CAMPOE, O. C., ALVARES, C., CARNEIRO, R. L., CEGATTA, Í., & STAPE, J. L. 2017. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 405, 271-283.

BOWYER, J. L.; HAYGREEN, J. G.; SCHMULSKY, R. 2003. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Fourth Edition. Iowa State Press.

BRAGA, F.D.A., VALE, F., MUNIZ, J., 1995. Movimentação de nutrientes no solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto, em função de doses de gesso e níveis de irrigação. *Bras. Ci. Solo*, 19, 69-77.

CAMPOS, J.C.C. 1970. Principais fatores do meio que afetam o crescimento das árvores. *Floresta*, v. 2, n. 3, p.45-52.

CORRÊA NETO TA, ANJOS LHC, PEREIRA MG, AMORIM HB, JACCOUD CFS. 2007. Atributos edafoambientais e parâmetros dendrométricos de plantios de

eucalipto em uma topossequência no campus da UFRRJ, Seropédica-RJ. *Ciência Florestal*; 17(1): 43-51.

COSTA, V. E., DE REZENDE, M. A., HORMAZA, J. M. 2007. Variation study on wood density of hybrid eucalyptus clones through gamma-ray attenuation technique of ^{241}Am . In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007. Santos, SP, Brasil. Anais... Santos.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. 1997. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2.ed. Viçosa: UFV. 390p.

FERNANDES, D. E.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; FERREIRA, M. Z. 2011. Influence of eucalypt hybrids clones productivity on wood basic density and kraft pulping yield. *Scientia Forestalis*, 39, 143-150.

FERREIRA, M. Z. 2009. Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e produção de *Eucalyptus* sp. (Tese). Lavras: Universidade Federal de Lavras.

GONÇALVES, J. D. M., MELLO, S. D. M., 2000. O sistema radicular das árvores. *Nutrição e fertilização florestal. IPEF, Brazil*, 219-267.

GOUVEA, A. G., GOMES, C. M., MATOS, L. M., SOUZA, T. A., KUMABE, F. J. B., BENITES, P. K. R. M., 2012. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose kraft. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 3(2), 10-12953.

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. 2005. Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman. 593 p.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual IBÁ 2017. São Paulo, 2017. 80 p.

JOHNSON, R. A. WICHERN, D. W. 2007. Applied multivariate statistical analysis, 6.ed. New Jersey: Prentice-Hall. 800 p.

LEAL, S., PEREIRA, H., GRABNER, M., WIMMER, R., 2004. Clonal and site variation of vessels in 7 year old *Eucalyptus globulus*. *IAWA Journal*, Leiden, v.24, n.2, p.185-195.

LEITE, F.P., BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., SANS, L.M.A., FABRES, A.S., 1997. Crescimento de *E. grandis* em diferentes densidades populacionais. *Rev. Árvore* 2, 313–321.

LELES, P.S.S., REIS, G.G., REIS, M.G.F., MORAIS, E.J., 2001. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. *Sci. For.* 59, 77–87.

- LITTLE, K. M.; VAN STADEN, J.; CLARKE, G. P. Y. 2003. *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* variability and intra-genotypic competition as a function of different vegetation management treatments. *New Forests*, Amsterdam, v. 25, n. 3, p. 227-242.
- MALAN, F. S., 1991. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. *South African Forestry Journal*, 157,16-23.
- MENESES, V.A., 2013. Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone do *Eucalyptus urophylla*. (Dissertação). UFV Universidade Federal de Lavras, Lavras, 110 pp.
- MEURER, E. J. 2007. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento de plantas. In: NOVAIS, R. F.; VENEGAS, V. H. A.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS. p. 65–90.
- MULLER-LANDAU, H. C., 2004. Interspecific and Inter-site Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Trees 1. *Biotropica*, 36(1), 20-32.
- NYLAND, R. D. 2007. *Silviculture: concepts and applications*. 2.ed. Long Grove: Waveland press. 682 p.
- NILSSON, U.; ALBAUGH, T.; ALLEN, H. L. 2002. Development of size hierarchies prior to the onset of density-dependent mortality in irrigated and fertilized loblolly pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 32, n. 6, p. 989-996.
- NILSSON, U.; ALLEN, H. L. 2003. Short-and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 175(1), 367-377.
- OBERHUBER, W.; GRUBER, A.; KOFLER, W.; SWIDRAK, I. 2014. Radial stem growth in response to microclimate and soil moisture in a drought-prone mixed coniferous forest at an inner Alpine site. *European journal of forest research*, 133(3), 467-479.
- OLIVEIRA, J. D., ROSSI, M. N., M CALDERANO FILHO, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida (No. 631.498161 M297). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil).
- ORLANDER, G.; NORDBORG, G.; GEMMEL, 2002. P. Effects of complete deep-soil cultivation on initial forest stand development. *Studia Forestalia Suecica*, Upsala, n. 213, p. 1-20.
- PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. 1980. Text Book of Wood Technology volume I. New York:McGraw Hill Book Company.

R CORE TEAM R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

REIS, G. G., REIS, M. G. F., FONTAN, I. C. I.; MONTE, M. C.; OLIVEIRA, C. H. R. 2006. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. *Revista Árvore*, 30(6): 921-931.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedências de *Eucalyptus* spp. IPEF. 46, 76-85.

RIBEIRO, M. D. D. S. B., JORGE, L. A. B., MISCHAN, M. M., SANTOS, A. L., BALLARIN, A. W. 2017. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. *Ciência Florestal*, 27(1), 31-45.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MONTEIRO DE MATOS, J. L., 2004. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. *Revista árvore*, 28, 267-273.

ROSADO, A. M., ROSADO, T. B., ALVES, A. A., LAVIOLA, B. G., BHERING, L. L. 2012. Simultaneous selection of eucalyptus clones based on yield, stability and adaptability. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(7), 964-971.

SEGHATOLESLAMI, M. J.; KAFI, M.; MAJIDI, E. 2008. Effect of drought stress at different growth stages on yield and water use efficiency of five proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Pakistan Journal of Botany*, Karachi, v. 40, n. 4, p. 1427-1432.

SETTE JR, C. R., TOMAZELLO FILHO, M., DIAS, C. T. D. S., LACLAU, J. P., 2010. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. *Revista árvore*, 34(6), 979-990.

SILVA, C. R. 2006. *Efeito do espaçamento e do arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de Eucalyptus na região Nordeste do Estado de São Paulo*. 2006. 51 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, J. W.; SOARES, L., FERREIRA, P. V., DA SILVA, P. P., DA SILVA, M. J. C. 2007. Correlações canônicas de características agroindustriais em cana-de-açúcar- DOI: 10.4025/actasciagron. v29i3. 279. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 29(3), 345-349.

SOUZA, R. F., FAQUIN, V., ROGÉRIO, P., TORRES, F., BALIZA, D. P., 2006. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), 975-983.

TROVATI, L. R., FERRAZ, E. S., 1984. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. IPEF, 26, 31-36.

TRUGILHO, P.F. 2003. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, v.9, n.1, p.66-80.

WOOLLONS, R. C.; SNOWDON, P.; MITCHELL, N. C. 1997. Augmenting empirical stans projections with edaphic and climatic variable. *Forest Ecology and Management*, Amsterdã, v.98, n.3, p.267-275.

YEH, H. Y.; WENSEL, L. C.; TURNBLOM, E. C. 2000. An objective approach for classifying precipitation patterns to study climatic effects on tree growth. *Forest Ecology and Management*, Amsterdã, v.139, n.1, p.41-50.

CAPÍTULO 2

EMPREGO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM USO DO INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ-CORTE

Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro ^a, Daniel Henrique Breda Binoti ^b,
Helio Garcia Leite ^c, Osvaldo Cesar Pinheiro de Almeida ^d; Adriano Wagner Ballarin ^a

^a Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

^b Departamento de Engenharia Florestal e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

^c Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 36570-000.

^d Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu.

RESUMO

O manejo florestal sustentável requer estimativas precisas do estoque de crescimento. Geralmente quando se pretende quantificar a produção florestal em termos de tonelada ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), é necessário estimar a densidade básica da madeira a partir de modelos matemáticos complexos, que dependem da constante amostragem destrutiva de árvores para seu ajuste e atualização. Apesar de cada vez mais as técnicas de amostragem não destrutiva estarem sendo empregadas para minimizar o custo relativamente alto do abate das árvores, elas não conseguem explicar a contento a variabilidade na densidade básica da madeira. Neste aspecto, a técnica de Redes Neurais Artificiais foi utilizada como alternativa para modelagem não linear, estimando a densidade básica a partir de bases de dados do inventário florestal pré-corte. O conhecimento adquirido pela rede foi aplicado a um cadastro de informações semelhantes, usando o método de generalização. Usando dados de uma empresa florestal, que engloba 2.988 ha distribuídos em cinco regiões edafoclimáticas, com 21 materiais genéticos com amplitude de idade variando de 4 a 11 anos, foram geradas as estimativas de densidade básica da madeira de forma rápida e eficaz, com raiz quadrada do erro quadrático médio de 1,92% para densidade com casca e 2,01% para sem casca.

Palavras-chave: Inventário florestal pré-corte; Redes Neurais Artificiais; Variáveis climáticas; *Eucalyptus* spp.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ESTIMATION OF THE WOOD BASIC SPECIFIC GRAVITY WITH THE USE OF PRE-CUTTING FOREST INVENTORY

ABSTRACT

Sustainable forest management requires accurate estimates of the growth stock. Generally when it is desired to quantify the forest production in terms of tonne (ton.ha⁻¹), it is necessary to estimate the basic specific gravity of the wood from complex mathematical models, which depend on the constant destructive sampling of trees for their adjustment and updating. Although non-destructive sampling techniques are increasingly being employed to minimize the relatively high cost of accurate sampling, they are unable to explain satisfactorily the variability in the wood basic specific gravity. With this aim, the Artificial Neural Networks technique was used as an alternative for non-linear modeling, estimating the wood basic specific gravity from the pre-cut forest inventory databases. The knowledge acquired by the network was applied to a register of similar information, using the generalization method. Using data from a forest company, which includes 2,988 ha distributed in five edaphoclimatic regions, with 21 genetic materials with age ranging from 4 to 11 years, wood basic specific gravity estimates were generated in a fast and efficient way, with root mean square error of 1.92% for analysis with full disks (wood+bark) and 2.01% for analysis considering disks without bark.

Keywords: Pre-cutting forest inventory; ANN – artificial neural network, climate variables; *Eucalyptus* spp.

2.1 INTRODUÇÃO

Nos empreendimentos florestais dedicados ao abastecimento de processos fabris - painéis, celulose e carvão - é mais efetiva a quantificação do estoque de madeira dos povoamentos em tonelada por hectare (ton.ha⁻¹) do que em volume por hectare (m³.ha⁻¹). Para isso, a estimativa da densidade básica da madeira torna-se procedimento imprescindível no processo de inventário florestal (CAMPOS; LEITE, 2013). As combinações de informações gerais do inventário e densidade básica

auxiliam na regulação do fluxo de abastecimento fabril para os planejamentos de curto, médio e longo prazos por permitir estimativas precisas de peso e rendimento industrial dos povoamentos avaliados.

Dentre os diversos tipos de inventário florestal, o inventário pré-corte (IPC) é o mais utilizado quando se pretende obter um retrato da situação atual da floresta (CAMPOS; LEITE, 2013). Ele é realizado antes da exploração florestal e são utilizadas, na maioria das vezes, parcelas temporárias com a finalidade de estimar a produção na época da medição (SOARES et al., 2011). Na prática, o diâmetro e a altura das árvores podem ser medidos facilmente em um inventário florestal, com custos relativamente baixos; contudo, a densidade básica da madeira não pode ser mensurada diretamente, porque requer tempo para os procedimentos laboratoriais e uma equipe treinada para desempenhá-los com exatidão (VAN LAAR, AKCA, 2007), tudo refletindo diretamente no aumento dos custos. Quando há necessidade de se trabalhar com informações mais específicas, a nível de clone, por exemplo, os impactos são ainda maiores, principalmente pela necessidade de se amostrar uma ampla base de dados que contemple todos os materiais genéticos em todas as variabilidades de sítio (LEITE; ANDRADE, 2002; HIGA et al., 2014).

Usualmente, modelos de regressão são usados para estimar a densidade, alimentados por dados obtidos através da amostragem destrutiva. Apesar dos custos adicionais, a amostragem destrutiva permite resultados mais precisos que os obtidos com métodos não destrutivos (THIERSCH et al., 2006). Os métodos não destrutivos mais comumente utilizados para avaliação da densidade básica da madeira são o Pilodyn e o Resistograph, assim como a combinação deles com modelos de regressão e com a inclusão de variáveis dendrométricas. Apesar da rapidez na estimativa da variável, já que dispensam a extração de amostras de madeira, os métodos não destrutivos possuem baixa representatividade do caule como um todo e, para obtenção de estimativas mais precisas, há necessidade de desenvolver modelos individuais para cada material genético (MCKENZIE et al., 2003; THIERSCH et al., 2006; WU et al., 2010; COUTO et al., 2013).

Devido às dificuldades operacionais e aos custos adicionais envolvidos na quantificação da densidade básica da madeira, continuamente novos procedimentos têm sido avaliados ao longo dos anos (DOWNES et al., 1997; MUNERI; RAYMOND, 2000; THIERSCH et al., 2006; GÖRGENS et al., 2014). Desenvolver metodologias que permitam estimar com rapidez e precisão a densidade da madeira,

extrapolando-a com confiabilidade, por unidade de manejo, tem sido um dos grandes desafios na biometria florestal.

Uma abordagem alternativa que vem sendo utilizada com sucesso na mensuração florestal, disponibilizando estimativas tão precisas quanto as feitas com uso de modelos de regressão ajustados por amostragem destrutiva são as Redes Neurais Artificiais (GÖRGENS et al., 2014; SILVA et al., 2009; CASTRO, 2011; CASTRO et al., 2013). As redes neurais artificiais (RNA) inserem-se no campo da inteligência artificial, sendo basicamente sistemas que reproduzem a maneira como o cérebro humano realiza uma tarefa particular (HAYKIN, 2001). Para alcançar bom desempenho, as redes neurais empregam uma interligação maciça de células computacionais - similares aos neurônios no cérebro - que têm a propensão natural de armazenar o conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso.

A habilidade das redes neurais de aprender possibilita a obtenção de estimativas mais precisas e exatas na mensuração e manejo florestal, por serem capazes de generalizar o conhecimento oriundo de uma base de dados conhecida para dados desconhecidos de um mesmo tipo de problema (BRAGA et al., 2000; HAYKIN, 2001; DIAMANTOPOULOU, 2005; CASTELLANOS et al., 2007; BINOTI et al., 2014; IMADA, 2014). Um fator importante no uso das RNA é a possibilidade da modelagem de diversas variáveis e suas relações não lineares, como resolver problemas complexos com variáveis numéricas e categóricas, como tipo de solo, espaçamento e características dos plantios e do sítio. De acordo com Binoti (2010), as variáveis categóricas são fundamentais na estratificação dos dados de inventário florestal, auxiliando na extração de características e a solução do problema tratado pelas RNA.

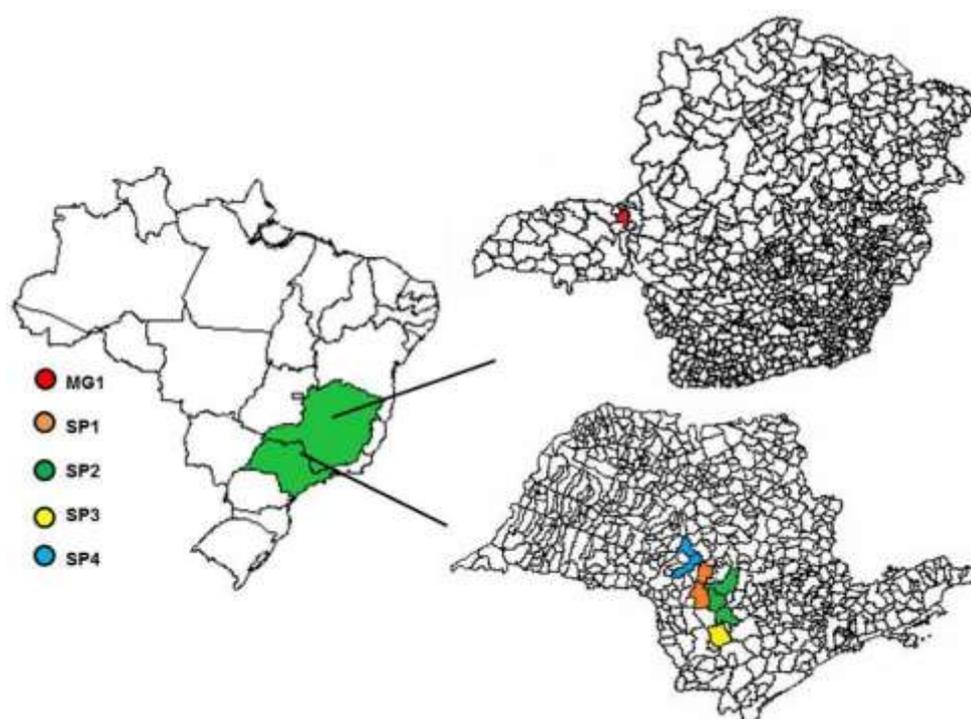
Neste contexto, o objetivo deste estudo é analisar a eficiência das redes neurais artificiais na estimativa da densidade básica da madeira considerando aspectos edafoclimáticos dos sítios, variáveis quantitativas e qualitativas observadas no inventário florestal pré-corte, como ferramenta de predição desse parâmetro para áreas com dados desconhecidos.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Local dos plantios e características edafoclimáticas das regiões

Os dados são provenientes de parcelas do inventário florestal pré-corte (IPC), cuja intensidade amostral gira em torno de 4 parcelas a cada 10ha, instaladas em povoamentos clonais e seminais de *Eucalyptus* spp.. As parcelas representam uma área total de 2.988 ha de efetivo plantio de uma empresa florestal, em primeira e segunda rotação, distribuídos em 8 municípios no estado de São Paulo (SP) e 1 município em Minas Gerais (MG), que englobam cinco zonas edafoclimáticas distintas (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Municípios de coleta dos dados divididos em cinco zonas edafoclimáticas: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4



Conforme as classificações de Köppen, nas áreas abordadas no estudo, ocorrem dois tipos de clima: Cfa e Aw. O clima Cfa é subtropical; com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida, abrangendo as regiões SP1, SP2 e SP3 (40% da área de estudo). O clima Aw é quente e úmido com chuvas de verão e inverno seco, abrangendo as regiões SP4 e MG1 (60% da área) (Tabela 2.1). Em ambas as categorias, há predominância do relevo suave ondulado. A maior parte dos solos do estado de São Paulo apresenta textura média-arenosa e do estado de Minas Gerais textura muito argilosa (CHAVES, 2012).

As classes de solo com suas respectivas texturas foram disponibilizadas pela empresa. Para as áreas que eventualmente a empresa não possuía informações sobre as características do solo (exclusivo para o estado de São Paulo), fez-se uso de informações de georreferenciamento aliadas à caracterização pedológica do estado (OLIVEIRA et al., 1999) para identificação das classes e texturas.

Tabela 2.1 – Características edafoclimáticas das cinco regiões de estudo

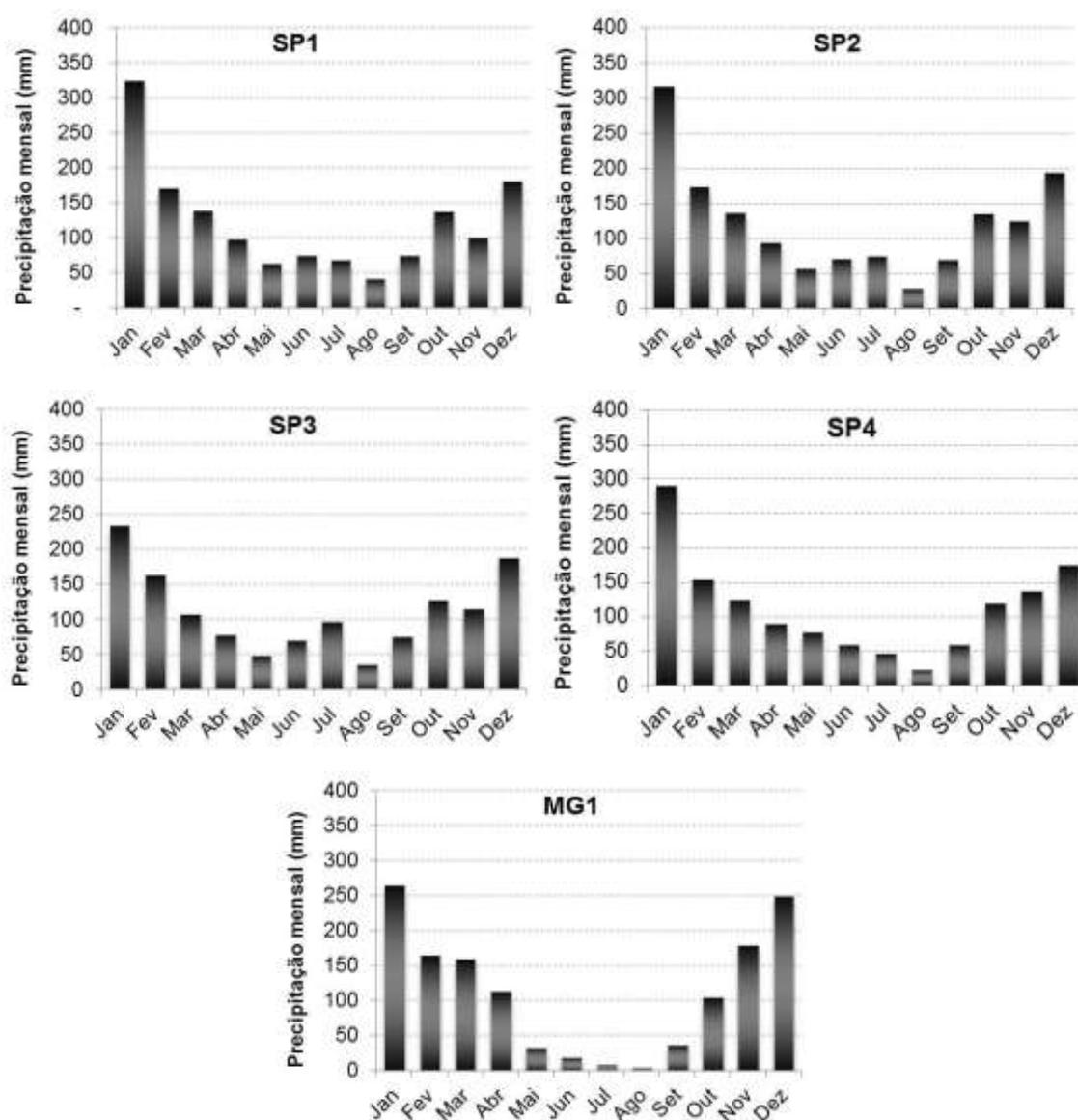
Regiões	Classes de Solo	Tipo de material genético	Textura	Área (ha)
SP1	Latossolo Vermelho	clonal	arenosa	146
			argilosa	144
			média	52
	Latossolo Vermelho-Amarelo	seminal	arenosa	43
			argilosa	20
			média	56
	Nitossolo Vermelho	seminal	média	41
argilosa			96	
Subtotal				599
SP2	Latossolo Vermelho	seminal	argilosa	35
			média	46
	Latossolo Vermelho-Amarelo	seminal	arenosa	202
			média	134
	Neossolo Quartzarênico	seminal	arenosa	107
Subtotal				524
SP3	Argissolo Vermelho	seminal	argilosa	10
	Argissolo Vermelho-Amarelo	seminal	arenosa	11
	Latossolo Vermelho	clonal	argilosa	28
		seminal	argilosa	16
Subtotal				65
SP4	Argissolo Vermelho-Amarelo	clonal	média	7
	Latossolo Vermelho	clonal	média	68
	Latossolo Vermelho-Amarelo	clonal	média	143
Subtotal				218
MG1	Latossolo Amarelo	clonal	muito argilosa	326
	Latossolo Vermelho	clonal	muito argilosa	239
	Latossolo Vermelho-Amarelo	clonal	muito argilosa	1.018
Subtotal				1.583

As precipitações anuais utilizadas no estudo foram obtidas de séries históricas de precipitação dos 9 municípios envolvidos. Para o estado de São Paulo as séries históricas representam os anos de 2006 a 2013; para o estado de Minas Gerais contemplam o intervalo de 2002 a 2013. Para a análise, cada quadra teve calculada

sua precipitação anual acumulada durante o período de referência – do plantio ao corte, a partir das precipitações médias anuais dos anos.

Apesar de algumas regiões apresentarem semelhante volume acumulado de chuva no ano, as características climáticas particulares de cada uma exercem influência sobre a distribuição mensal, podendo ser caracterizadas situações distintas com distribuição regular ao longo do ano ou irregular, com longos períodos de estiagem (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Médias mensais de precipitação de 2006-2013 para as cinco regiões edafoclimáticas



2.2.2 Dados dos povoamentos

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de 936 árvores amostras de *Eucalyptus* spp. obtidas de 21 materiais genéticos, sendo 11 clonais e 10 procedências de sementes, com idade variando de 4 a 11 anos, distribuídos em nove diferentes arranjos espaciais (2,50 x 1,80m; 2,80 x 3,00m; 2,80 x 3,20m; 3,00 x 1,50m; 3,00 x 1,80m; 3,00 x 1,85m; 3,00 x 1,90m; 3,00 x 2,00m; 3,00 x 3,00m; 4,00 x 1,10m; 4,00 x 1,50m; 4,50 x 1,33m) que levaram as áreas vitais variarem de 4 a 9 m² por árvore.

Uma descrição da variação da densidade observada, e das variáveis obtidas no inventário são apresentadas na Tabela 2.2. Os valores que extrapolaram a tendência geral, das variáveis utilizadas em função da idade, não foram eliminados, a fim de verificar a capacidade das redes neurais artificiais em lidar com *outliers* ou ruídos.

Tabela 2.2 – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão das variáveis analisadas

Parâmetro	Identificação	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Precipitação Anual Acumulada (mm)	<i>precip-media</i>	1.330	1.456	1.589	65,56
Temperatura Média (°C)	<i>temp-media</i>	19,10	20,20	21,40	0,91
Idade (anos)	<i>idade</i>	4	6,6	11	1,07
Diâmetro (cm)	<i>Dap</i>	13,10	15,46	19,50	1,42
Altura (m)	<i>altura</i>	21,50	25,39	30,20	2,39
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	<i>area-basal</i>	19,00	27,00	33,00	3,58
Área Vital (m ² .árvore ⁻¹)	<i>area-vital</i>	4	7	9	1,53
Produtividade (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	<i>product</i>	32,00	52,00	74,00	9,56
Relação diâmetro-altura	<i>rel-dap/h</i>	0,54	0,61	0,71	0,03
Relação área basal - Nº fuste por hectare	<i>rel-ab-fuste</i>	0,01	0,02	0,03	0,00
Densidade básica com casca (Kg.m ⁻³)	<i>Dbcc</i>	331	431	550	49,11
Dbcc básica sem casca (Kg.m ⁻³)	<i>Dbcc</i>	338	450	577	42,84

2.2.3 Redes Neurais Artificiais - treinamento e generalização

Foram configuradas, treinadas e validadas redes do tipo *Multilayer Perceptron* - MLP. As arquiteturas das redes variaram de acordo com as variáveis de entrada utilizadas - redes com todas as variáveis de entrada e com as variáveis altamente correlacionadas resultantes de estudos prévios com correlações canônicas. Como variáveis categóricas (qualitativas) foram consideradas: material genético, classe de

solo e textura do solo. Como variáveis numéricas (quantitativas) foram consideradas: idade na coleta das amostras, área vital ($\text{m}^2.\text{árvore}^{-1}$), precipitação anual média acumulada (mm) no período de referência (do plantio ao corte), temperatura anual média ($^{\circ}\text{C}$), altura total (m), o diâmetro com casca a 1,30m de altura do solo - dap -, a área basal - ab - ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), número de fustes por hectare, volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) e as relações diâmetro-altura - rel-d/h - e área basal-número de fustes por hectare - rel-ab/fuste. A camada oculta foi constituída de apenas uma camada, com quantidade de neurônios variando de 8 a 20. As variáveis de saída (*outputs*) foram densidade básica com casca - comumente utilizada na indústria de painéis - e densidade básica sem casca, mais utilizada pela indústria de celulose.

A função sigmoide foi utilizada na ativação da camada oculta e de saída e o algoritmo de treinamento foi o *Resilient Propagation*. Conforme Leite et al. (2016), este algoritmo proporcionou os melhores resultados gráficos dentre os avaliados na estimativa da densidade básica da madeira. As variáveis numéricas foram normalizadas linearmente no intervalo de 0 a 1 (HEATON, 2011). Esses dados foram separados aleatoriamente em 80% para treinamento e 20% para generalização do modelo, com uso do sistema Neuroforest 3.2 (Disponível em <http://neuroforest.ucoz.com/>).

Os pesos iniciais de todas as redes foram gerados aleatoriamente. Como critério de parada dos algoritmos de treinamento utilizou-se o número total de ciclos (limitado a 10.000 ciclos) ou o erro quadrático médio (inferior a 1%).

Na fase de generalização, para a avaliação das estimativas da densidade básica com e sem casca, geradas pelas redes neurais, foram utilizadas algumas estatísticas e a análise gráfica dos resíduos. As estatísticas empregadas foram a correlação entre os valores observados e estimados ($r_{D\hat{D}}$), que indica o grau de associação entre os valores (CAMPOS; LEITE, 2013) - Equação 2.1 - e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), normalizada pela média - Equação 2.2 - (MEHTÄTALO et al., 2006). Assim, sendo Db_i ($i = 1, \dots, n$) os valores observados da densidade básica da madeira e $\hat{D}\hat{b}_i$ a densidade básica estimada pela RNA, tem se:

$$r_{D\hat{D}} = \frac{\text{cov}(Db_i, \hat{D}\hat{b}_i)}{\sqrt{s^2(Db_i)s^2(\hat{D}\hat{b}_i)}} \quad (2.1)$$

onde: $s^2(Db_i)$ e $s^2(\widehat{Db}_i)$ são as variâncias dos valores observados e estimados, respectivamente, e $cov(Db_i, \widehat{Db}_i)$ a covariância.

$$RMSE(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Db_i - \widehat{Db}_i)^2}{n}} / \overline{Db} \quad (2.2)$$

onde: \overline{Db} é a média das densidades básicas observadas e n é o número total de observações.

A análise gráfica dos resíduos consistiu na inspeção estatística da dispersão dos erros percentuais em relação aos valores observados (Equação 2.3).

$$erro(\%) = \frac{(\widehat{Db}_i - Db_i)}{Db_i} \times 100 \quad (2.3)$$

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Densidade básica da madeira

As Tabelas 2.3 e 2.4 sintetizam respectivamente as características das regiões edafoclimáticas estudadas e as densidades básicas com e sem casca, mensuradas por amostragem destrutiva das árvores, reportadas para os materiais genéticos.

Tabela 2.3 – Valores médios das variáveis analisadas por região edafoclimática

Região	Clima	Textura do Solo	Temperatura Média (°C)	Precipitação anual (mm)	Produtividade (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Dbcc (kg.m ⁻³)	Dbsc (kg.m ⁻³)
SP1	Cfa	arenosa	20,33	1.453	54	409	423
		argilosa	20,41	1.472	63	410	425
		média	20,36	1.460	54	412	428
Média SP1			20,37	1.467	58	409	424
SP2	Cfa	arenosa	19,18	1.489	51	406	421
		argilosa	19,90	1.428	54	430	445
		média	19,41	1.527	56	407	423
Média SP2			19,50	1.485	54	414	429
SP3	Cfa	arenosa	19,90	1.381	62	387	399
		argilosa	19,90	1.376	52	409	422
Média SP3			22,47	1.388	52	471	496
SP4	Aw	média	20,75	1.390	54	464	488
MG1	Aw	Estrela do Sul	23,53	1.427	44	481	509

Dbcc: densidade básica da madeira com casca, Dbsc: densidade básica da madeira sem casca

Tabela 2.4 – Valores médios da amostragem de densidade básica da madeira com e sem casca por material genético

Tipo material genético	Espécie / Cruzamento	Material genético	Dbcc (kg.m ⁻³)		Dbsc (kg.m ⁻³)	
			Real	Estimado RNA	Real	Estimado RNA
Clonal	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00020	472	466 (2,4%) *	498	491 (2,59%)
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00021	477	472 (1,2%)	504	499 (1,07%)
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00156	489	491 (3,05%)	520	522 (3,32%)
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00157	461	446 (3,90%)	484	467 (4,24%)
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00159	466	465 (3,58%)	493	491 (3,69%)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00061	457	463 (1,58%)	478	484 (1,92%)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00122	482	474 (3,11%)	510	499 (3,33%)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00123	417	414 (2,08%)	432	429 (2,22%)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00339	395	408 (4,80%)	413	425 (4,7%)
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00376	498	496 (1,63%)	525	524 (1,99%)
Seminal	<i>E. grandis</i>	G-212	414	400 (5,93%)	428	412 (6,18%)
	<i>E. grandis</i>	G-214	422	424 (4,9%)	435	439 (5,25%)
	<i>E. grandis</i>	G-216	389	383 (2,69%)	404	397 (2,78%)
	<i>E. grandis</i>	G-217	403	401 (6,83%)	416	414 (7,37%)
	<i>E. grandis</i>	G-221	407	399 (3,47%)	422	415 (3,27%)
	<i>E. grandis</i>	G-222	418	416 (3,25%)	435	433 (3,02%)
	<i>E. grandis</i>	G-231	393	409 (6,81%)	424	427 (7,21%)
	<i>E. grandis</i>	G-232	393	409 (8,54%)	406	422 (6,17%)
	<i>E. grandis</i>	G-234	394	403 (9,41%)	404	417 (9,94%)
	<i>E. grandis</i>	G-236	393	398 (6,23%)	408	413 (6,82%)

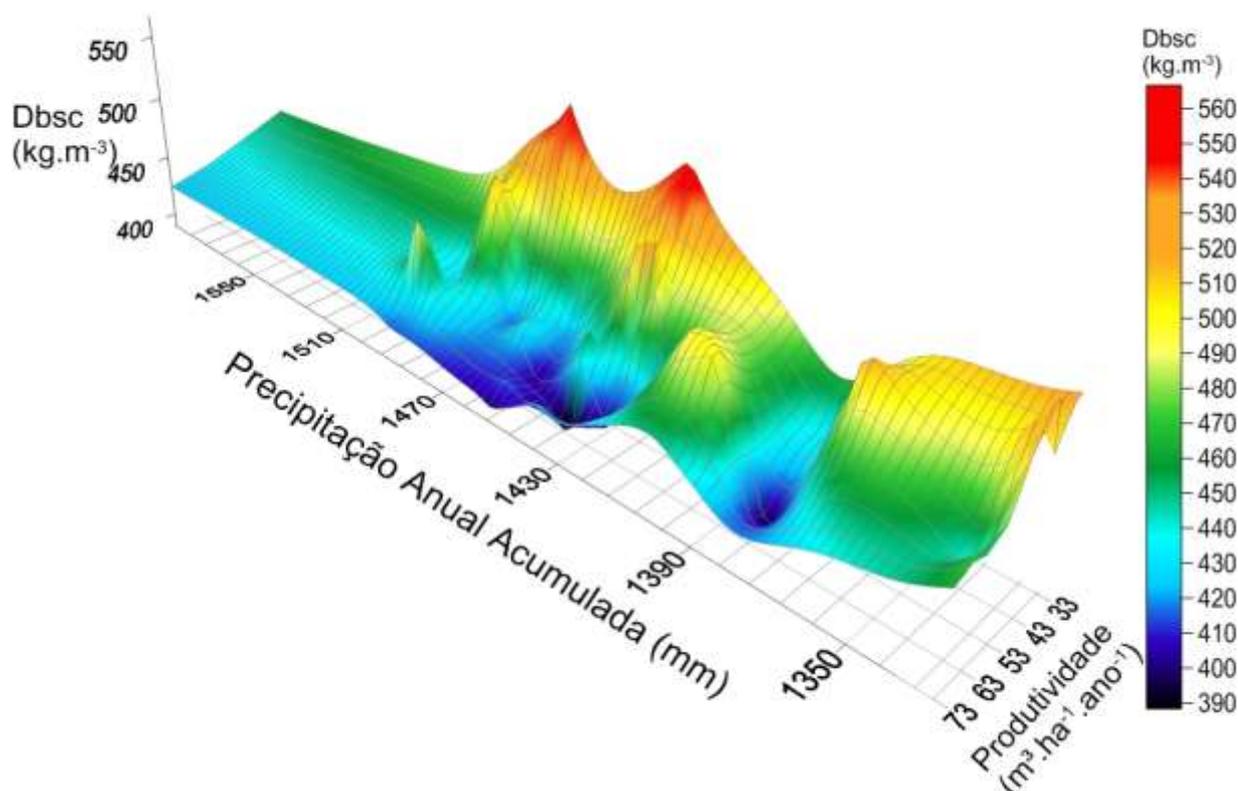
Dbcc: densidade básica da madeira com casca, Dbsc: densidade básica da madeira sem casca; *Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE%) normalizado pela média dos valores de densidade básica com e sem casca estimados pela RNA para cada material genético.

Compreender as inter-relações entre a árvore e os vários fatores do meio onde ela cresce é muito complexo para possibilitar uma simples análise ou síntese. Contudo, comportamentos e tendências na variação da densidade básica podem ser esclarecidos ao correlacioná-los com algumas características da espécie, de forma a complementar a interpretação dos resultados.

A Figura 2.3 apresenta a variação da densidade básica da madeira com as características do sítio, aqui analisadas por meio dos padrões de produtividade da floresta e da precipitação anual acumulada. Os resultados estão condizentes com o descrito na literatura: em que regiões com clima favorável ao desenvolvimento das árvores proporcionam maior incremento médio anual e formação de madeira com

densidade básica baixa (WIMMER et al., 2002; BOWYER et al., 2003; MORONI et al., 2003; MULLER-LANDAU, 2004; BERGÈS et al., 2008).

Figura 2.3 – Variação da densidade básica sem casca (kg.m^{-3}) com a produtividade ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) e a precipitação anual acumulada (mm)



2.3.2 Processamento das Redes Neurais Artificiais

Dentre as combinações utilizadas entre variáveis, os melhores resultados de generalização (validação) para a estimativa da densidade básica da madeira foram obtidos com arquitetura 35-08-02. A camada de entrada foi constituída de 35 neurônios, sendo 9 neurônios para as variáveis numéricas, 25 neurônios para as categóricas e 1 neurônio com entrada fixa de valor 1, referente ao limiar de excitação.

Como entradas categóricas, foram utilizadas: material genético – 21 neurônios – e textura do solo – 4 neurônios; como variáveis numéricas: a área vital,

rotação, idade, precipitação anual acumulada, temperatura, altura, diâmetro (dap), área basal e produtividade – 9 neurônios – A precisão das redes foi a característica utilizada para seleção dos melhores resultados. Os resultados foram influenciados pela quantidade de neurônios nas camadas de entrada e oculta. A rede com 8 neurônios na camada oculta gerou um ajuste mais preciso nas características estatísticas obtidas de RMSE(%) e correlação ($r_{Db\widehat{Db}}$) (Tabela 2.5).

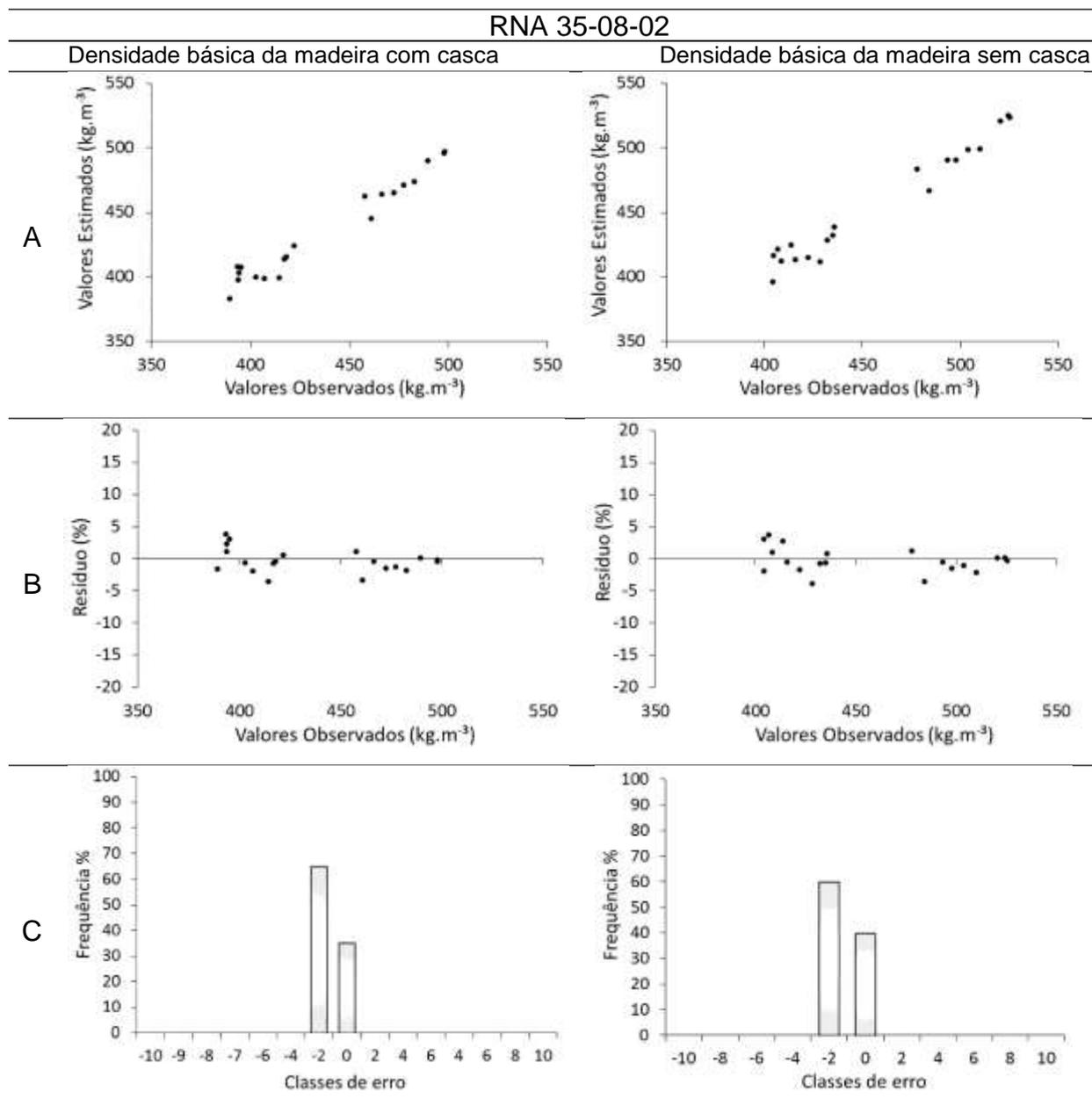
Tabela 2.5 – Características e estatísticas da RNA selecionada para estimar a densidade básica da madeira

Entradas Categóricas	Entradas Numéricas	Arquite- tura*	Estatísticas							
			Treinamento				Generalização			
			RMSE(%)		$r_{Db\widehat{Db}}$		RMSE(%)		$r_{Db\widehat{Db}}$	
Dbcc	Dbsc	Dbcc	Dbsc	Dbcc	Dbsc	Dbcc	Dbsc			
<i>matgen,</i> <i>textura</i>	<i>área-vital,</i> <i>rotação, idade</i> <i>precipitação,</i> <i>temperatura,</i> <i>altura, dap,</i> <i>area-basal,</i> <i>produtividade</i>	35-08-02	4,32	4,51	0,898	0,906	1,92	2,01	0,935	0,934

* Número de neurônios em cada camada: 35 neurônios na camada de entrada, 08 na camada oculta e 02 na saída; *matgen*: material genético; *textura*: textura do solo; *área-vital* em m² por árvore; *rotação*; *idade*; *precipitação* anual acumulada; *temperatura* média; *altura, dap*: diâmetro; *área-basal* em m² por hectare; *produtividade* em m³.ha⁻¹.ano⁻¹; *Dbcc*: densidade básica com casca (kg.m⁻³); *Dbsc*: densidade básica sem casca (kg.m⁻³); $r_{Db\widehat{Db}}$: correlação entre densidade básica estimada e observada; *RMSE*(%): raiz quadrada do erro quadrático médio normalizado pela média (em %).

Além da análise estatística da RNA selecionada, procedeu-se a análise gráfica dos resultados, de forma a evitar possíveis erros de tendência em virtude da amplitude dos dados da variável resposta. Neste contexto, a Figura 2.4 apresenta as dispersões residuais, a relação entre os valores estimados e observados e, os histogramas da fase generalização para a rede que apresentou os melhores ajustes (35-08-02).

Figura 2.4 – (A) Relação entre valores observados e estimados para a densidade básica; (B) Dispersão dos resíduos - erros percentuais - nas estimativas em função dos valores observados de densidade básica; (C) Histograma dos erros nas estimativas pelas RNA



2.4 DISCUSSÃO

2.4.1 Densidade básica da madeira

O *Eucalyptus* spp. tem sua origem na Austrália e possui mais de 600 espécies catalogadas (MORA; GARCIA, 2000). Em função da ampla diversidade, algumas espécies produzem madeira de elevada densidade básica, outras produzem madeira com densidade básica moderada a baixa. Como a densidade da madeira é resultado da combinação da quantidade e da distribuição dos diferentes elementos anatômicos, o componente espécie é muito importante no processo; segundo Roque e Tomazello Filho (2009), madeiras de espécies diferentes com mesma densidade não são tecnologicamente ou anatomicamente semelhantes. Os padrões básicos de variação na qualidade da madeira são herdáveis, mas o ambiente modifica estes padrões básicos de várias maneiras (LARSON, 1963).

Na Tabela 2.4 observa-se a ocorrência de maior uniformidade entre os indivíduos – representada pelo baixo coeficiente de variação – das espécies híbridas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Na sequência, a maior uniformidade foi observada nos materiais híbridos de *Eucalyptus* spp. Acredita-se que, por se tratar de materiais com elevado grau de melhoramento genético, os indivíduos desta espécie apresentaram maior uniformidade entre plantas e superioridade dos valores de densidade básica, que se explica por sua maior adaptação às condições de sítio nas regiões de plantio. Em um estudo realizado por Tonello e Teixeira Filho (2011) foi caracterizado o comportamento ecofisiológico de dois clones comerciais híbridos entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com a mesma idade no mesmo sítio de plantio, e observaram diferenças nas respostas dos clones em função das variáveis ambientais, assim como em relação à eficiência do uso da água. De acordo com Caldeira et al. (2002), a eficiência do uso de nutrientes varia de acordo com as espécies florestais, procedências e/ou clones, e sua avaliação de acordo com o genótipo auxilia o silvicultor na escolha do material a ser utilizado nos projetos florestais.

Na análise da Tabela 2.3, observa-se que as regiões de estudo com melhores condições de sítio proporcionaram maior crescimento volumétrico - representado pelas maiores produtividades - e refletiram na formação de madeira de menor densidade básica. Estes resultados estão condizentes com a literatura, em que

baixas densidades estão associadas a ambientes favoráveis ao crescimento com boa distribuição hídrica, temperaturas mais elevadas e solos mais férteis e de boa qualidade (BAKER et al., 2004; MULLER-LANDAU, 2004; ROQUE; TOMAZELLO FILHO, 2009). No entanto, comportamento singular é observado na Figura 2.3 para o índice de precipitação anual médio de 1.388mm – região edafoclimática SP3; nesta região do gráfico, observam-se baixas densidades básicas tanto nas altas produtividades quanto nas baixas. O material genético predominante nesta região foi *Eucalyptus grandis* de origem seminal G-212, que não foi influenciado pelas características do solo, tendo baixas densidades básicas tanto em solo arenoso – com produtividade de 62m³.ha.ano – quanto em solo argiloso – com produtividade de 52m³.ha.ano – em índices de precipitação semelhantes.

A variação na distribuição das chuvas influenciou a densidade básica da madeira diferentemente nas regiões do estudo. Em 2009 com a ocorrência do *El Niño*, drásticas anomalias na distribuição das chuvas ocorreram, influenciando direta e indiretamente a produtividade florestal (OLIVEIRA et al., 2011). De acordo com Trenberth (1991) e CPTEC (2016), em anos de *El Niño* observa-se um acréscimo bastante significativo nos índices pluviométricos em quase todo o sudeste do Brasil. As regiões SP4 e MG1 não foram influenciadas pelo *El Niño* de 2009, o que reforça as características das regiões de clima Aw, com baixos índices de precipitação anual acumulada e distribuição irregular das chuvas ao longo do ano - submetendo a floresta a *déficit* hídrico em alguns meses (Figura 2.2). Gonçalves et al. (2013), trabalhando com *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. em diferentes regiões edafoclimáticas observaram que as regiões com clima Aw e Cfa, com chuvas mal distribuídas entre as estações, proporcionaram estresse hídrico de médio a alto à floresta. Assim, os resultados encontrados neste trabalho seguem a mesma tendência encontrada na literatura, pois nas regiões de clima Aw, a distribuição das chuvas influenciou mais fortemente a densidade básica do que o volume acumulado anual.

Resultados semelhantes foram encontrados por Gouvea et al. (2012) e Meneses (2013) para *Eucalyptus urophylla*, que em regiões com menores índices de precipitação há redução na capacidade produtiva do sítio, influenciando positivamente a densidade. A condição de *stress* hídrico tende a reduzir o tamanho das células e provocar mudanças na espessura da parede celular, o que resulta na formação de madeira de densidade básica elevada (HUDSON et al., 1998; WIMMER et al., 2002). De acordo com Almeida et al. (2004), plantios de *Eucalyptus* spp.

gerenciados em rotações curtas (5-7 anos), um período seco durante sua rotação pode diminuir drasticamente seu rendimento.

2.4.2 Estimativas da densidade básica da madeira pelas Redes Neurais Artificiais

De forma geral, a correlação entre valores observados e estimados tanto para densidade básica com casca quanto para sem casca, apresentou um bom ajuste, com previsão adequada para valores altos de densidade básica e também para os valores baixos de densidade básica, ou seja, sem tendências (Tabela 2.5).

Foram obtidos resultados satisfatórios com a configuração de 08 neurônios na camada oculta (RNA 35-08-02). Uma análise dos resultados gráficos sugere que as estimativas fornecidas pela metodologia proposta apresentam homogeneidade na distribuição da variável estimada com relação ao valor real da densidade básica (Figura 2.4). Com base nos resultados estatísticos, a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) da RNA 35-08-02 estimada com dados do inventário florestal pré-corte foi de 1,92% para a densidade básica com casca e de 2,01% para densidade básica sem casca, o que proporciona variações de densidade básica de $8,27 \text{ kg.m}^{-3}$ e de $8,64 \text{ kg.m}^{-3}$, respectivamente, com um grau de associação ($r_{Db\bar{D}\bar{b}}$) de 93,5% tanto para densidade com casca quanto para sem casca. De acordo com Mehtätalo et al. (2006), as redes mais simples, com menor número de neurônios, tendem a ter um poder de generalização melhor e podem superar problemas de *overfitting*, logo, estas devem ser preferidas.

Mesmo que coeficientes estatísticos sejam bons indicadores para a seleção da RNA, a análise gráfica de resíduos, a dispersão dos valores observados em relação aos estimados e o histograma de frequência do erro são fundamentais na escolha da melhor rede; erros de tendência podem ocorrer em determinada amplitude de classe da variável resposta, sem ser detectadas pelas estatísticas que medem a exatidão (CAMPOS; LEITE, 2013). Observa-se aderência dos dados estimados pela rede (Figura 2.4) ao longo do eixo de erro zero (0), onde concentra-se a maioria da dispersão das variáveis estimadas pelas redes neurais. Quanto à avaliação da distribuição entre valores observados e estimados, é importante sua verificação para que o processo de estimação mantenha a mesma distribuição dos dados, evitando-se, assim, distorções e alterações no comportamento da variável original.

Vários estudos baseados em modelos de regressão relataram valores de coeficiente de determinação próximos de 85% quando utilizados em conjunto com as medições de penetração da agulha Pilodyn e de 65% a 74% quando combinados com resultados de resistência e perfuração coletados usando Resistograph (KAHL et al., 2009, WU et al., 2010). Couto et al. (2013) estudaram métodos não destrutivos para estimativa de densidade em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e coeficientes de determinação observados de moderada (82%) a baixa (32%), respectivamente os valores registrados usando métodos de Resistograph e Pilodyn não conseguiram explicar suficientemente a variabilidade na densidade básica. Assim, a precisão da RNA gerada neste estudo foi 9% maior do que as estimativas geradas por modelos matemáticos complexos para estimação da densidade básica.

Além das melhorias estatísticas, uma das principais vantagens do uso de RNA é o potencial de utilizar os resultados obtidos das redes para estimar dados desconhecidos, incluindo análises da variabilidade intrínseca do local, do material genético e da idade da floresta.

2.5 CONCLUSÃO

As regiões amostradas tiveram comportamento da densidade básica dentro do padrão clássico de normalidade, comprovado pela variação de seus valores com fatores influentes, como precipitação, temperatura, textura do solo e área vital. Regiões com condições de sítio favoráveis - maior disponibilidade hídrica – proporcionaram maior produtividade ao povoamento, ou seja, as árvores apresentaram maior crescimento volumétrico e madeira de menor densidade básica.

O melhoramento genético proporcionou maior uniformidade entre os indivíduos nos padrões de densidade básica da madeira, com e sem casca, independentemente do sítio. Os padrões de uniformidade forem crescentes à medida que o grau de melhoramento genético era aumentado, partindo dos plantios seminais de *Eucalyptus grandis*, para os híbridos de *Eucalyptus* spp. e por último, os híbridos entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

As redes neurais artificiais podem ser utilizadas na estimativa da densidade básica da madeira para as unidades de manejo. Fornecem resultados estatísticos melhorados - em relação aos modelos de regressão – e os coeficientes de correlação obtidos foram da ordem de 93%. A técnica não requer grandes

investimentos anuais na amostragem de densidade para identificar variações de sítio, idade e floresta. Além disso, a inclusão das variáveis qualitativas, - material genético e textura de solo – e variáveis ambientais, foi uma estratégia apropriada de modelagem por tratar áreas com dados limitados, pois a densidade básica foi fortemente influenciada por elas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.C., LANDSBERG, J.J., SANDS, P.J., AMBROGI, M.S., FONSECA, S., BARDDAL, S.M., BERTOLUCCI, F.L., 2004. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*. 193 (1), 167–177.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; DI FIORE, A.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; LLOYD, J.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; PATIÑO, S.; PITMAN, N. C. A.; SILVA, N.; MARTÍNEZ, R. V. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, Oxford, v. 10, n. 5, p. 545- 562.
- BERGÈS, L.; NEPVEU, G.; FRANC, A., 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, 255 (3/4), 567-579.
- BINOTI, M. L. M. S., 2010. Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto. 54f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. 2014. Configuração de Redes Neurais Artificiais para estimação do volume de árvores. *Ciência da Madeira*, Pelotas, Maio 58-67.
- BOWYER, J. L.; HAYGREEN, J. G.; SCHMULSKY, R. 2003. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Fourth Edition. Iowa State Press.
- BRAGA, A. DE P.; CARVALHO, A. P. DE L. F. DE; LUDEMIR, T. B., 2000. *Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações*. 262p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G., 2013. *Mensuração florestal: Perguntas e respostas*. Universidade Federal de Viçosa, 605p.
- CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M. V. 2002. Avaliação da eficiência nutricional de três procedências australianas de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). *Revista Árvore*, v. 26, n. 5, p. 615-620.
- CASTELLANOS, A.; BLANCO, A. M.; PALENCIA, V., 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222.

CASTRO, R.V.O. 2011. Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B., MARTINS, F. B., LEITE, H. G. 2013. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(3), 287-295.

CHAVES, R., 2012. Relatório: Desenvolvimento Silvicultural - MDS. (Arquivos Internos) Duratex Florestal.

CPTEC, 2016. Monitoramento e previsão do fenômeno *El-Niño* e *La-Niña*. Disponível em: www.cptec.inpe.br/enos. Acesso em: 17 de fev. 2016.

COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., NEVES, T. A., PROTÁSIO, T. D. P., SÁ, V. A. D., 2013. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. *Cerne*, 19(1), 27-34.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 48, n.3, p. 235-244.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2012. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2(4), 190-197.

DOWNES, G.M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R.; MUNERI, A., 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties. Melbourne: CSIRO. 126p.

FOELKEL, C., 2009. Papermaking properties of eucalyptus trees, woods and pulp fibers. *Eucalyptus Online Book Newsletter*.

GONÇALVES, J. L. M., ALVARES, C. A., HIGA, A. R., SILVA, L. D., ALFENAS, A. C., STAHL, J., ... BOUILLET, J. P. D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27.

GÖRGENS, E. B., LEITE, H. G., GLERIANI, J. M., SOARES, C. P. B., CEOLIN, A. 2014. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 38(2).

GOUVEA, A. G., GOMES, C. M., MATOS, L. M., SOUZA, T. A., KUMABE, F. J. B., BENITES, P. K. R. M., 2012. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose kraft. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 3(2), 10-12953.

HAYKIN, S., 2001. Redes neurais: princípios e prática. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 900 p.

HEATON, J. 2011. *Programming Neural Networks with Encog3 in Java*. 2.ed. Heaton Research, Incorporated. 240 p.

HUDSON, I., WILSON, L., VAN BEVEREN, K. 1998. Vessel and fibre property variation in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: some preliminary results. *IAWA Journal*, 19(2), 111-130.

IMADA, 2014. A Literature review: forest management with neural network and artificial intelligence. In: *Neural Networks and Artificial Intelligence: 8th International Conference ... 2014, Belarus. Proceedings...* Brest State Technical University, p.9-21.

KAHL, T.; WIRTH, C.; MUND, M.; BOHNISCH, G.; SCHULZE, E. D., 2009. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. *European Journal of Forestry Research*, London, v. 128, p. 467-473.

LARSON, P. R. 1963. Evaluating the environment for studies of the inheritance of wood properties. In: *WORLD CONSULTATION ON FOREST GENETICS AND TREE IMPROVEMENT*, Stockholm, Proceedings. Rome: FAO. v.2, 10p.

LEITE, H. G., BINOTI, D. H. B., OLIVEIRA NETO, R. R. D., LOPES, P. F., CASTRO, R. R. D., PAULINO, E. J., ... COLODETTE, J. L. 2016. Redes Neurais Artificiais para a estimação da densidade básica da madeira. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 149-154, mar.

MARTINS, E.R.; BINOTI, M.L.M.S.; LEITE, H.G.; BINOTI, D.H.B.; DUTRA, G.C. 2016. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto. *Agrária*, v.11, n.2, p.117-123.

MCKENZIE, H. M.; SHELBOURNE, C. J. A.; KIMBERLEY, M. O.; MCKINLEY, R. B.; BRITTON, R. A. J. 2003. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products: 2., predicting product quality from tree, increment core, disc and 1-m billet properties. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 33, n. 1, p. 79-113, Feb.

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

MENESES, V.A., 2013. *Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone do Eucalyptus urophylla*. (Dissertação). UFV Universidade Federal de Lavras, Lavras, 110 p.

MORA, A.L. GARCIA, C.H. 2000. *A cultura do Eucalipto no Brasil*. São Paulo: SBS.

MORONI, M. T.; NORLEDGE, D.; BEADLE, C. L., 2003. Root distribution of *Eucalyptus nitens* and *E. globules* in irrigated and droughted soil. *Forest Ecology and Management*, v. 177, p. 399-407.

- MULLER-LANDAU, H. C., 2004. Interspecific and Inter-site Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Trees 1. *Biotropica*, 36(1), 20-32.
- OLIVEIRA, J. D., ROSSI, M. N., M CALDERANO FILHO, B. 1999. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida* (No. 631.498161 M297). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil).
- OLIVEIRA, B.R.U., DE FIGUEIREDO LATORRACA, J.V., TOMAZELLO FILHO, M., GARCIA, R.A., DE CARVALHO, A.M., 2011. Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. *Ciência Florestal*, 21(3), 499-508.
- OLIVEIRA, G. M. V.; MELLO, J. M. DE; TRUGILHO, P. F.; SCOLFORO, J. R. S.; ALTOÉ, T. F.; SILVA NETO, A. J. DE; OLIVEIRA, A. D. de. 2012. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do Estado de Minas Gerais. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, abr./jun.
- ROQUE, R., TOMAZELLO FILHO, M. 2009. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. Radial variation of the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees from different climatic and management conditions in Costa Rica. *Scientia*, 37(83), 273-285.
- SILVA, M.L.M. DA; BINOTI, D.H.B.; GLERIANI, J.M.; LEITE, H.G. 2009. Ajuste do modelo de *Schumacher e Hall* e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, v.33, p.1133-1139.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. 2011. *Dendrometria e inventário florestal*. 2 ed. Viçosa: UFV.
- THIERSCH, C. R., SCOLFORO, J. R., DE OLIVEIRA, A. D., REZENDE, G. D. S. P., MAESTRI, R., 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12(3), 264-278.
- TONELLO, K. C.; TEIXEIRA FILHO, J. 2011. Efeito das variáveis ambientais no comportamento ecofisiológico de dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*: condições de campo. *Scientia Forestalis*, v.39, n. 92, p. 419-431.
- TRENBERTH, K. E., 1991. General characteristics of El Niño-Southern Oscillation, *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies* MH Glantz, RW Katz, N. Nicholls, 13–42.
- VAN LAAR, A., AKCA, A. (Eds.), 2007. *Forest mensuration*. Springer Science Business Media. Vol. 13
- WIMMER, R.; DOWNES, G.M.; EVANS, R., 2002. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. *Tree Physiology*, 22:449-457.

WU, S., XU, J., LI, G., RISTO, V., LU, Z., LI, B., WANG, W. 2010. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, London, v. 21, n. 1, p. 68-72.

CAPÍTULO 3

EFICIÊNCIA DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA A PARTIR DE DADOS DE INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO

Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro ^a, Daniel Henrique Breda Binoti ^b, Helio Garcia Leite ^c, Osvaldo Cesar Pinheiro de Almeida ^d; Adriano Wagner Ballarin ^a

^a Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

^b Departamento de Engenharia Florestal e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

^c Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

^d Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu.

RESUMO

Na indústria de base florestal a densidade básica é um dos mais importantes parâmetros de qualidade da madeira. O conhecimento prévio da densidade básica da madeira com e sem casca de *Eucalyptus* spp. permite a redução no consumo de madeira e a homogeneização do processo fabril, gerando ganhos tanto para a área florestal quanto para a área industrial. As técnicas usualmente utilizadas na estimativa da densidade básica por unidade de manejo dependem de uma ampla amostragem de campo para geração das bases de dados de processamento, que implica em custos adicionais ao inventário florestal. Com esse intento, a técnica de Redes Neurais Artificiais foi utilizada como alternativa para modelagem não linear, estimando a densidade básica a partir de bases de dados históricas e aplicando o conhecimento adquirido pela rede a todo um cadastro de informações semelhantes pelo método de generalização. A partir dos dados de cinco regiões edafoclimáticas e de suas características quantitativas e qualitativas do sítio, foram geradas estimativas de forma rápida e eficaz, com raiz quadrada do erro quadrático médio de 1,97% para densidade com casca e 2,06% para sem casca. Além do potencial estatístico, o método em si proporciona ganhos em custo operacional por utilizar bases de dados de séries históricas para o ajuste das estimativas, reduzindo a necessidade de novas amostragens.

Palavras-chave: Inventário florestal contínuo, Redes Neurais Artificiais; *Multilayer Perceptron*, *Eucalyptus* spp.

EFFICIENCY OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ESTIMATION OF WOOD BASIC SPECIFIC GRAVITY FROM CONTINUOUS FOREST INVENTORY

ABSTRACT

In the manufacturing process, basic specific gravity is one of the most important characteristics of wood that affect the productive process in the forest-based industry. Knowing in advance the specific gravity of *Eucalyptus* spp. allows the reduction in wood consumption and the homogenization of the process, which generates gains, both for the forest area and for the industrial area. The techniques usually used to estimate the specific gravity per unit of management depend on a wide field sampling for generation of the processing databases, which implies additional costs to the forest inventory. With this intent, the technique of Artificial Neural Networks was used as an alternative for nonlinear modeling, estimating the specific gravity from historical databases and applying the knowledge acquired by the network to a whole register of similar information by the generalization method. From the data of five edaphoclimatic regions and quantitative and qualitative characteristics of the site, estimates of the basic specific gravity were generated quickly and efficiently, with root mean square error of 1.97% for analysis with full disks (wood+bark) and 2.06% for analysis considering disks without bark. In addition to the statistical potential, the method itself provides gains in operating cost by using historical series databases for the adjustment of estimates, reducing the need for new samplings.

Keywords: Forest inventory; ANN – Artificial Neural Network; Multilayer perceptron; *Eucalyptus* spp.

3.1 INTRODUÇÃO

Na indústria de base florestal, os principais aspectos considerados nas linhas de produção são a produtividade e a qualidade do produto. Os produtos de madeira têm exigências cada vez maiores de qualidade, por parte do mercado consumidor. O controle da qualidade é complexo, mesmo nos processos industriais, visto que são vários os fatores intervenientes e suas possíveis interações. A variabilidade natural

das características da madeira influencia na qualidade do produto e torna esse controle de qualidade ainda mais complexo.

A densidade básica é um índice de qualidade da madeira aceito universalmente é a densidade básica, principalmente pela correlação que possui com outras características da madeira e pela influência na qualidade do produto final. Na indústria de papel e celulose, uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações precisas acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo, que geralmente estão associados às características de qualidade e de propriedades físico-mecânicas da polpa (FOELKEL, 2009; FERNANDES et al., 2011). O mesmo pode ser afirmado para a indústria de painéis de madeira, na qual, diferentemente a árvore é aproveitada integralmente com casca. A densidade influencia diretamente o processo de picagem, o dimensionamento dos cavacos e o consumo específico de madeira (em m³) por tonelada de produto (CHAUHAN; BIST, 1987; PANSIN; ZEEUW, 1980; KRZYSIK et al., 2001; BOWYER et al., 2003).

Diante da estreita relação entre a densidade básica da madeira e a produção de celulose e de painéis de madeira, as técnicas de inventário florestal têm evoluído de forma a detalhar ao máximo as informações sobre as áreas florestais, diversificando seus resultados para fins industriais e adequando a maneira de expressar a produção florestal para tonelada de madeira por hectare (ton.ha⁻¹). Esta tendência tem sido fortemente aprimorada para que as predições dos sortimentos tenham relação direta com o produto final e auxiliem no planejamento florestal da empresa, tanto de curto quanto de longo prazo, permitindo que as tomadas de decisão sejam muito mais assertivas e reais (THIERSCH et al. 2006; CAMPOS; LEITE, 2013). Além disso, a possibilidade de inclusão de características do povoamento na modelagem da densidade básica resulta em estimativas mais precisas e possibilita que o modelo seja aplicado em regiões com condições distintas.

A inclusão de variáveis edáficas e climáticas em um modelo de estimativa de densidade básica, apesar de possibilitar um maior realismo biológico, trazem complexidades à modelagem e à quantificação destas influências sobre a densidade básica. Alguns processos de tomada de decisão contêm componentes qualitativos - como a classificação do solo e material genético - variáveis categóricas que trazem complexidade a modelagem quando integradas em equações matemáticas.

(MALAN, 1991; RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993; BOWYER et al., 2003; FERNANDES et al., 2011; MENESES, 2013).

As empresas florestais tem em seus acervos técnicos grande quantidade de dados de densidade básica de suas áreas de plantio. Esse aspecto favorece a implementação de estudos com redes neurais artificiais para a estimativa da densidade básica das árvores sem o uso dos modelos de regressão convencionais.

De fato, as redes neurais vêm sendo aplicadas no meio florestal com grande sucesso (KOURTZ, 1990; PENG; WEN, 1999; ÖZÇELIK et al., 2010; CASTELLANOS et al., 2007; IMADA, 2014). O potencial e a capacidade preditiva das redes com base no aprendizado supervisionado possibilitam a obtenção de estimativas mais precisas e exatas na mensuração e manejo florestal, no geral, superiores aos métodos convencionais de regressão por serem capazes de generalizar o conhecimento oriundo de uma base de dados conhecida para dados desconhecidos de um mesmo tipo de problema. Uma rede neural é formada basicamente por um conjunto de unidades sensoriais que constituem a camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e a camada de saída (LEK et al., 1996; DIAMANTOPOULOU, 2005; ALEKSANDER; MORTON 1990; KOURTZ, 1990; HAYKIN, 2001). Redes que possuem uma ou mais camadas ocultas são denominadas *Multilayer Perceptron* - MLP. A MLP recebe a aprendizagem por um processo iterativo, conhecido como aprendizagem por experiência, onde os padrões de treinamento são apresentados à rede e com base nos erros obtidos, são realizados ajustes nos pesos sinápticos, com o intuito de minimizar o erro nas próximas interações (RIEDMILLER; BRAUN, 1993; HAYKIN, 1999, 2001, BRAGA et al., 2000; ARBIB, 2003; BULLINARIA, 2004). A minimização do erro é realizada por um algoritmo de treinamento. Riedmiller e Braun (1993) recomendam o uso do *resilient propagation*, que trata-se de uma derivação do algoritmo *backpropagation*. No *resilient propagation*, os pesos são baseados em informações dos dados presentes, onde para cada peso é introduzido um valor individual de atualização. Inicialmente os pesos de todas as redes são gerados aleatoriamente (HEATON, 2010). Posteriormente, esse valor individual de atualização evolui durante o processo de aprendizado baseado na função do erro.

Uma abordagem alternativa para modelagem da densidade básica é também com o uso de redes neurais artificiais (RNA). Apesar de existirem diversas ferramentas computacionais e de modelagem, as RNA destacam-se, sobretudo em

função da possibilidade de modelagem com variáveis qualitativas e da adaptabilidade dos pesos das conexões às modificações do ambiente (SILVA et al., 2009; LEITE et al., 2016).

Neste contexto, o objetivo deste estudo é analisar a eficiência das RNA na estimativa da densidade básica da madeira do gênero *Eucalyptus* a partir de dados de manejo, edafoclimáticos e dendrométricos provenientes do inventário florestal contínuo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Material experimental

O estudo envolve uma área total de 2.764ha de plantio de *Eucalyptus* spp. de uma empresa florestal com plantios nos estados de São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG) - Figura 3.1. Os dados dos plantios são oriundos de bases de inventário florestal contínuo, cujas parcelas permanentes instaladas prescrevem a recomendação de uma parcela a cada 10ha de efetivo plantio.

Figura 3.1 – Regiões de coleta dos dados envolvendo cinco zonas edafoclimáticas: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4



Na Região Sudeste, existe um gradiente climático de um estado para outro, sendo que o clima Cfa é o predominante (ALVARES et al., 2013). Nas regiões abordadas no estudo ocorrem dois tipos de clima: Cfa e Aw, conforme a classificação de Köppen. O Cfa é subtropical, com verões quentes, abrangendo as regiões SP1, SP2 e SP3 (53% da área de estudo). O clima Aw é tropical com estação seca no inverno, abrangendo as regiões SP4 e MG1 (47% da área).

As informações de precipitação anual utilizadas no estudo foram obtidas de séries históricas de precipitação de 11 principais municípios compreendidos nas regiões. Em oito municípios do estado de São Paulo e um em Minas Gerais foram utilizados dados históricos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), cujas estações encontravam-se próximas à área de estudo. Outros dois municípios - Agudos e Lençóis Paulista – ambos em São Paulo, os dados históricos foram disponibilizados pela empresa proprietária dos plantios, no período de 2006 a 2013 (Figura 3.2). Os valores de precipitação anual que cada quadra recebeu durante o período de referência (do plantio ao corte) foram tratados individualmente, ano a ano, em função da amplitude de variação da idade da floresta – plantios a partir de 2006 com 7 anos de idade até plantios de 2009 com 4 anos de idade.

As informações históricas de temperatura anual média para os municípios de São Paulo e Minas Gerais foram consultadas no Centro Integrado de Informações Meteorológicas (CIIAGRO, 2016) e no Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet, 2016), com exceção dos municípios de - Lençóis Paulista e Agudos – cujos dados históricos de temperatura foram fornecidos pela empresa. Os valores de temperatura média anual em cada quadra durante o período de referência (do plantio ao corte) foram tratados individualmente, ano a ano, em função da amplitude de variação da idade da floresta, seguindo a mesma metodologia dos dados de precipitação (Figura 3.3).

Figura 3.2 – Precipitação anual das cinco regiões edafoclimáticas no período de 2006 a 2013

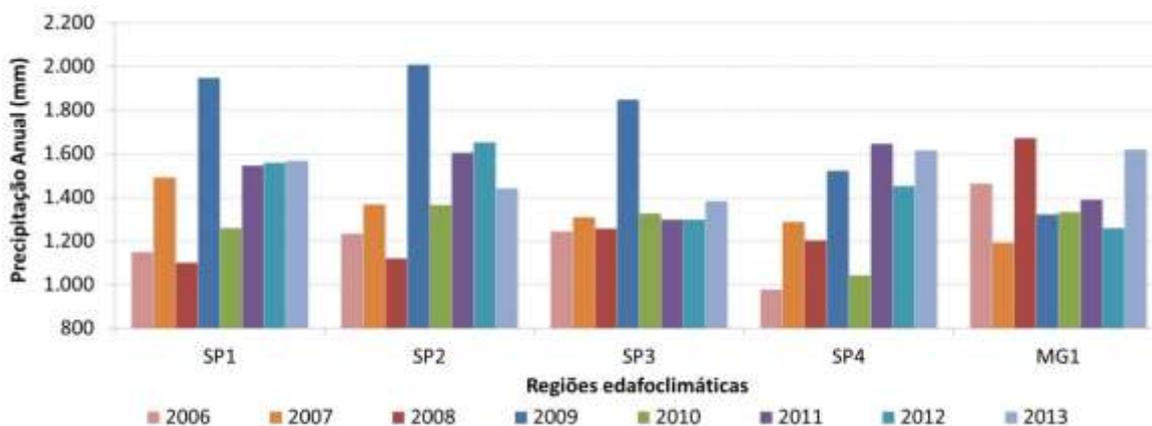
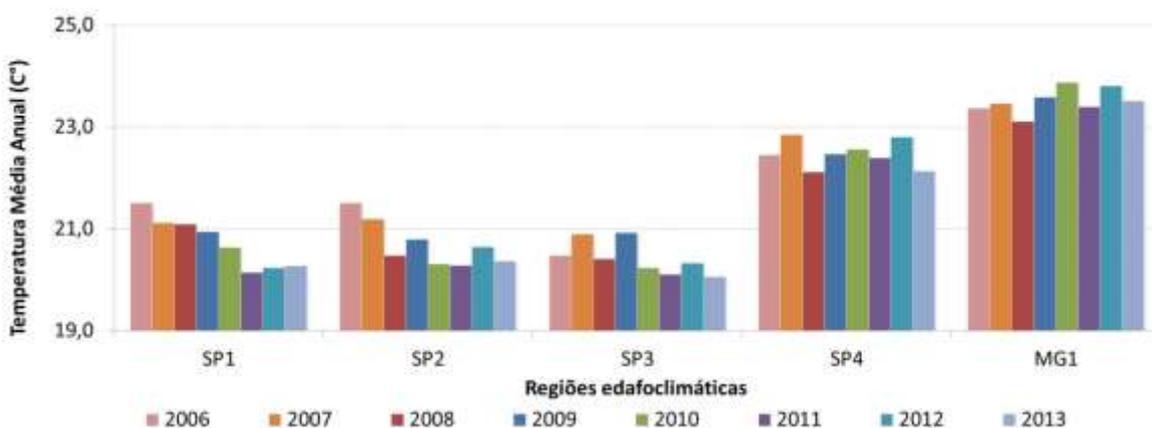


Figura 3.3 – Temperatura média anual das cinco regiões edafoclimáticas no período de 2006 a 2013



Os solos predominantes na área de estudo são Latossolo Vermelho-Amarelo seguidos por Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Quartzarenico, Nitossolo Vermelho, Argissolo Vermelho e Argissolo Amarelo, com textura variando de arenosa à argilosa para o estado de São Paulo, e em Minas Gerais, Latossolo Vermelho-Amarelo predominantemente seguidos por Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho, ambos com textura muito argilosa (Tabela 3.1). As classes de solo com suas respectivas texturas foram informadas pela empresa proprietária dos plantios. Para as áreas que a empresa não possuía informações sobre as características do solo (exclusivo para o estado de São Paulo), fez-se uso de informações de georreferenciamento aliadas à caracterização pedológica do estado (OLIVEIRA et al., 1999).

Tabela 3.1 – Características do solo dos municípios nas regiões do estudo

Região	Clima	Município	Textura de Solo	Classe de Solo
SP1	Cfa	Avaré	arenosa	Latossolo Vermelho
			argilosa	Nitossolo Vermelho
			média	Latossolo Vermelho-Amarelo
		Lençóis Paulista	arenosa	Latossolo Vermelho
			argilosa	Latossolo Vermelho
			média	Latossolo Vermelho Latossolo Vermelho-Amarelo
SP2	Cfa	Angatuba	argilosa	Latossolo Vermelho
			média	Latossolo Vermelho Latossolo Vermelho-Amarelo
		Botucatu	arenosa	Latossolo Vermelho-Amarelo
			média	Latossolo Vermelho-Amarelo
		Itatinga	arenosa	Latossolo Vermelho-Amarelo Neossolo Quartzarênico
SP3	Cfa	Buri	arenosa	Argissolo Vermelho-Amarelo
			argilosa	Latossolo Vermelho Argissolo Vermelho
		Itapetininga	média	Latossolo Vermelho-Amarelo
SP4	Aw	Agudos	média	Latossolo Vermelho-Amarelo Argissolo Vermelho-Amarelo Argissolo Amarelo
		Bauru	média	Latossolo Vermelho
		Piratininga	média	Argissolo Vermelho
MG1	Aw	Estrela do Sul	muito argilosa	Latossolo Vermelho Latossolo Vermelho-Amarelo Latossolo Amarelo

As informações de densidade básica foram obtidas junto a empresa, que procedeu mensurações na idade de corte de 1.074 árvores de 25 materiais genéticos, sendo 14 clonais e 11 seminais, em primeira e segunda rotação, com idade variando de 4 a 7 anos. As árvores amostradas estavam distribuídas em 100 unidades de manejo (quadras), com espaçamentos de plantio correspondentes a áreas vitais variando de 4,0 a 9,0 m² por árvore. A amostragem abordou aleatoriamente diferentes características administrativas, edafoclimáticas e fisiográficas, de forma a maximizar a ocorrência do material genético em diferentes regiões edafoclimáticas. A Tabela 3.2 apresenta os dados do povoamento e das densidades básicas com e sem casca para os materiais genéticos avaliados nos diferentes espaçamentos de plantio por região.

Tabela 3.2 – Dados dos plantios e das densidades básicas com e sem casca

Região	Tipo Material Genético	Espaçamento (m)	Material genético	Produtividade (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Dbcc (kg.m ⁻³)	Dbsc (kg.m ⁻³)
SP1	clonal	3.00 X 1.85	DE00020	58	426	448
			G03158	55	443	462
		3.00 X 2.00	GU00061	40	461	480
			GU00122	60	464	488
			GU00123	50	415	431
			GU00339	61	405	423
		GU00376	52	419	441	
	Média clonal			55	431	451
	seminal	3.00 X 2.00	G-232	55	394	406
			G-234	70	404	417
			G-236	64	387	399
			G-237	53	404	416
		4.50 X 1.33	G-214	54	418	433
Média seminal			60	399	412	
Média SP1			57	415	431	
SP2	seminal	3.00 X 1.50	G-231	48	407	419
			G-232	45	414	428
		3.00 X 2.00	G-217	48	401	414
			G-231	44	417	432
			G-234	47	400	413
			G-236	51	399	415
		4.00 X 1.50	G-214	54	430	445
			G-216	57	384	398
			G-221	48	400	416
			G-222	61	414	431
Média SP2			50	407	421	
SP3	clonal	3.00 X 1.90	GU00123	55	419	434
			G03158	51	483	510
		3.00 X 2.00	GU00122	39	451	481
			GU00123	50	420	440
			GU00389	59	432	462
		GU00391	44	473	507	
	Média clonal			50	447	475
	seminal	2.50 X 1.80	G-212	65	398	409
		4.00 X 1.10	G-212	61	389	401
		3.00 X 1.50	G-217	51	403	416
Média seminal			59	394	406	
Média SP3			54	421	440	

Continua...

Continuação...

Região	Tipo Material Genético	Espaçamento (m)	Material genético	Produtividade (m ³ cc.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Dbcc (kg.m ⁻³)	Dbsc (kg.m ⁻³)
SP4	clonal	3.00 X 1.80	DE00020	71	412	430
			GU00123	50	407	424
			GU00339	66	367	384
		3.00 X 1.85	GU00122	53	478	505
			G03158	62	482	507
		3.00 X 2.00	GU00061	43	463	485
			GU00122	45	487	515
			GU00123	47	441	460
			GU00339	69	430	448
		Média clonal				49
seminal	3.00 X 2.00	G-237	51	434	449	
Média SP4				50	449	469
MG1	clonal	2.80 X 3.20	DE00020	52	459	484
			DE00021	50	464	490
			DE00156	44	478	511
			DE00157	56	442	465
			DE00159	39	471	497
			GU00061	35	492	521
			GU00122	43	533	562
			GU00376	50	463	491
			GU00392	47	487	518
			3.00 X 3.00	DE00021	56	449
DE00156	39	488		519		
DE00157	41	442		461		
Média MG1				46	472	499

3.2.2 Redes Neurais Artificiais - treinamento e generalização

As RNA usadas na estimativa da densidade básica da madeira com e sem casca foram treinadas utilizando variáveis categóricas (qualitativas) e numéricas (quantitativas) como entrada (*input*). Como variáveis categóricas foram consideradas: material genético, classe de solo e textura do solo. As variáveis numéricas foram divididas em três classes. A 1ª classe representa as variáveis que não sofreram alteração ao longo dos anos, que são a área-vital, a rotação e a idade; a 2ª classe foi representada pelas variáveis precipitação e temperatura, mensuradas ano a ano ao longo do desenvolvimento da floresta - cada unidade de manejo (quadra) possui valores individuais de precipitação e temperatura para cada idade;- a 3ª classe foi representada pelas variáveis mensuradas sistematicamente ao longo dos anos no inventário florestal contínuo (IFC), sendo elas: altura total (m), diâmetro

com casca a 1,30m de altura do solo - dap -, área basal - ab - (m²), número de fustes por hectare, volume (m³.ha⁻¹.ano⁻¹) e as relações diâmetro-altura - d/h - e área basal-número de fustes por hectare - ab/fuste. As variáveis de saída (*outputs*) foram densidade básica com casca - comumente utilizada na indústria de painéis - e a densidade básica sem casca, mais utilizada pela indústria de celulose.

As variáveis numéricas foram normalizadas linearmente no intervalo de 0 a 1 (HEATON, 2011). Os dados foram separados aleatoriamente em 80% para treinamento e 20% para generalização do modelo, com uso do sistema Neuroforest 3.2 (Disponível em <http://neuroforest.ucoz.com/>), com o qual redes do tipo *Multilayer Perceptron* – MLP foram configuradas, treinadas e validadas.

A função sigmoide foi utilizada na ativação da camada oculta e de saída e o algoritmo de treinamento foi o *Resilient Propagation*. Os pesos iniciais de todas as redes foram gerados aleatoriamente. Como critério de parada dos algoritmos de treinamento utilizou-se o número total de ciclos (limitado a 10.000 ciclos) ou o erro quadrático médio (inferior a 1%).

Na fase de generalização, para a avaliação das estimativas da densidade básica com e sem casca, geradas pelas redes neurais, foram utilizadas algumas estatísticas e a análise gráfica dos resíduos. As estatísticas empregadas foram a correlação entre os valores observados e estimados ($r_{D\hat{D}}$), que indica o grau de associação entre os valores (CAMPOS; LEITE, 2013) - Equação 3.1 - e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), normalizada pela média - Equação 3.2 - (MEHTÄTALO et al., 2006). Assim sendo, Db_i ($i = 1, \dots, n$) os valores observados da densidade básica da madeira e $\hat{D}b_i$ a densidade básica estimada pela RNA, tem se:

$$r_{D\hat{D}} = \frac{cov(Db_i, \hat{D}b_i)}{\sqrt{s^2(Db_i)s^2(\hat{D}b_i)}} \quad (3.1)$$

onde: $s^2(Db_i)$ e $s^2(\hat{D}b_i)$ são as variâncias dos valores observados e estimados, respectivamente, e $cov(Db_i, \hat{D}b_i)$ a covariância.

$$RMSE(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Db_i - \overline{Db})^2}{n}} / \overline{Db} \quad (3.2)$$

onde: \overline{Db} é a média das densidades básicas observadas e n é o número total de observações.

A análise gráfica dos resíduos consistiu na inspeção estatística da dispersão dos erros percentuais em relação aos valores observados, como mostrado na Equação 3.3.

$$erro(\%) = \frac{(\overline{Db}_i - Db_i)}{Db_i} \times 100 \quad (3.3)$$

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Variações na densidade básica da madeira amostrada e estimada

A diversidade de fatores ambientais que interagem e afetam os plantios florestais, induzem respostas das espécies a estes fatores, fazendo com que cada sítio tenha características próprias (RODRIGUES et al., 2003).

No universo dos dados analisados, a Tabela 3.3 apresenta alguns resultados estatísticos para a densidade básica com e sem casca, referentes à média, densidade máxima e mínima e seus respectivos coeficientes de variação e desvio padrão. Por meio da análise do coeficiente de variação, se observa a homogeneidade dos dados de densidade básica. De acordo com Pimentel-Gomes (1985), um coeficiente de variação de 10% é considerado baixo para ensaios com dados florestais.

Tabela 3.3 – Análise descritiva das mensurações de densidade básica com e sem casca

Variáveis (kg.m ⁻³)	Max	Min	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Densidade básica com casca	540	327	424	39	9
Densidade básica sem casca	570	333	442	45	10

As estimativas geradas pelas RNA foram desenvolvidas para cada material genético presente nas regiões de estudo. A Tabela 3.4 apresenta resultados individualizados, proporcionando detalhamento e compreensão dos materiais que foram melhor caracterizados pela rede selecionada.

Tabela 3.4 – Estimativas de densidade básica com e sem casca geradas pela RNA para os materiais genéticos

Tipo Material Genético	Espécie	Material Genético	Dbcc (kg.m ⁻³)			Dbsc (kg.m ⁻³)		
			Real	Estimado RNA	RMSE (%)	Real	Estimado RNA	RMSE (%)
Clonal	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00020	454	447	2,36%	480	470	2,72%
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00021	469	460	1,93%	496	486	1,99%
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00156	482	479	3,08%	513	511	3,30%
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00157	443	442	1,15%	464	464	1,17%
	<i>Híbrido E. urophylla</i>	DE00159	451	472	2,37%	475	490	1,92%
	<i>E. grandis</i>	G03158	480	483	1,27%	502	510	2,30%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00061	484	482	0,94%	509	508	0,62%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00122	473	475	3,46%	500	502	3,66%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00123	424	422	2,00%	441	440	2,00%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00339	402	396	2,27%	418	416	1,71%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00376	472	473	0,17%	500	502	0,30%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00392	471	477	1,19%	498	506	1,51%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00389	433	431	1,17%	464	462	1,37%
	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	GU00391	466	475	2,19%	498	510	2,44%
Seminal	<i>E. grandis</i>	G-212	401	402	4,02%	414	414	4,32%
	<i>E. grandis</i>	G-214	424	421	3,29%	439	435	3,50%
	<i>E. grandis</i>	G-216	387	384	4,59%	404	397	5,34%
	<i>E. grandis</i>	G-217	378	394	6,90%	389	406	7,36%
	<i>E. grandis</i>	G-221	395	400	1,38%	410	416	1,53%
	<i>E. grandis</i>	G-222	414	415	4,35%	430	431	4,65%
	<i>E. grandis</i>	G-231	423	408	9,28%	438	421	10,05%
	<i>E. grandis</i>	G-232	400	404	6,17%	412	417	6,41%
	<i>E. grandis</i>	G-234	411	400	5,63%	423	413	5,61%
	<i>E. grandis</i>	G-236	393	396	6,69%	407	411	7,14%
	<i>E. grandis</i>	G-237	410	423	7,39%	423	437	8,10%

3.3.2 Característica e precisão das Redes Neurais Artificiais

Dentre as combinações entre variáveis de entrada e saída, foram avaliadas 12 redes com arquiteturas distintas. Inicialmente foram mantidas todas as variáveis de entrada e saída, proporcionando uma arquitetura de 87 neurônios na camada de entrada e 2 neurônios para saída, para densidade básica com e sem casca. Gradativamente algumas variáveis de entrada foram sendo eliminadas da análise até a obtenção de um resultado satisfatório. A precisão das redes foi a característica utilizada para seleção dos melhores resultados (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Características e precisão da RNA selecionada para estimar a densidade básica da madeira

RNA	Arquite- tura*	Variáveis de Entrada		Variáveis de Saída	Generalização			
		Categóricas	Numéricas		RMSE%		$r_{D\hat{D}}$	
					Dbcc	Dbcc	Dbcc	Dbcc
1.0	87-08-02	<i>matgen, solo, textura</i>	<i>área-vital, rotação, idade, precipitação temperatura, altura, dap, produtividade, area-basal, rel-dap- altura, rel-ab-fustes</i>	Dbcc e Dbcc	1,98	2,07	0,932	0,933
1.1	87-08-01			Dbcc	2,04		0,944	
1.2	87-08-01			Dbcc	2,06		0,940	
2.0	72-08-02	<i>matgen, solo, textura</i>	<i>área-vital, rotação, idade, precipitação temperatura, altura, dap, produtividade</i>	Dbcc e Dbcc	1,97	2,06	0,932	0,932
2.1	72-08-01			Dbcc	2,00		0,934	
2.2	72-08-01			Dbcc	2,15		0,937	
3.0	72-08-02	<i>matgen, solo, textura</i>	<i>área-vital, rotação, idade, precipitação temperatura, produtividade, area- basal, rel-dap-altura, rel-ab-fustes</i>	Dbcc e Dbcc	2,03	2,12	0,936	0,935
3.1	72-08-01			Dbcc	2,02		0,942	
3.2	72-08-01			Dbcc	2,24		0,932	
4.0	44-08-02	<i>matgen</i>	<i>área-vital, rotação, idade, altura, dap, produtividade</i>	Dbcc e Dbcc	2,12	2,22	0,936	0,936
4.1	44-08-01			Dbcc	2,02		0,934	
4.2	44-08-01			Dbcc	2,15		0,939	

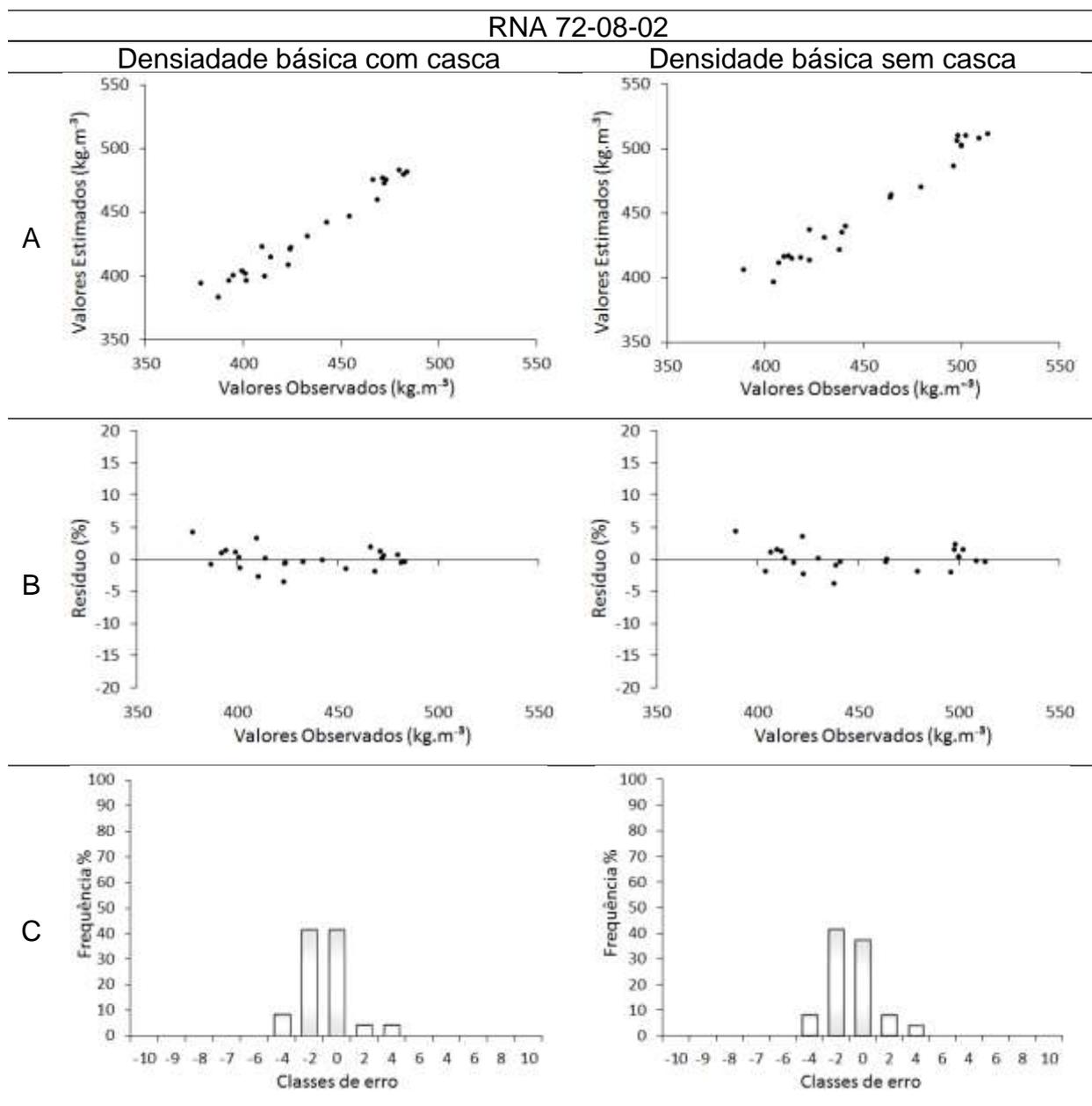
* Número de neurônios em cada camada: 87 a 44 neurônios na camada de entrada, 08 na camada oculta e 01 a 02 na saída; *matgen*: material genético; *solo*: classe de solo; *textura*: textura do solo; *área-vital*; *rotação*; idade, *precipitação*; *temperatura*; *dap*: diâmetro; *altura*; *área-basal*; produtividade em $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$; *rel-dap-h*: relação entre *dap* e *altura*; *rel-ab-fustes*: relação entre *área basal* e nº de fustes por hectare; *Dbcc*: densidade básica com casca ($kg \cdot m^{-3}$); *Dbcc*: densidade básica sem casca ($kg \cdot m^{-3}$); $r_{D\hat{D}}$: correlação entre densidade básica estimada e observada; *RMSE%*: raiz quadrada do erro quadrático médio normalizado pela média (em %).

Os resultados foram influenciados pela quantidade de neurônios nas camadas de entrada e ocultas, sendo, por essa razão, considerados fatores de relevância na resposta do modelo. Para a mesma configuração de dados de entrada foram avaliadas arquiteturas entre 8 e 20 neurônios na camada oculta. Nesta última configuração não foram observadas grandes variações nas características estatísticas obtidas de RMSE(%) e correlação ($r_{D_b\widehat{D}_b}$); desta forma, seguindo recomendação de Bullinaria (2004) e Mehtätalo et al. (2006), além do critério estatístico, a rede mais simples, com menor número de neurônios, deve ser preferida para que o processo de busca e de otimização seja facilitado.

Os melhores resultados de generalização (validação) para a estimativa da densidade básica da madeira foram obtidos na rede 2.0 com arquitetura 72-08-02. A camada de entrada foi constituída de 72 neurônios, sendo 34 neurônios para as variáveis numéricas, 37 neurônios para as categóricas e 1 neurônio com entrada fixa de valor 1, referente ao limiar de excitação. As variáveis numéricas, divididas em três classes, apresentavam na 1ª classe: representação única para área-vital, rotação e idade – 3 neurônios, na 2ª classe, as medições anuais foram representadas por 8 neurônios para precipitação e 8 neurônios para temperatura – 16 neurônios – e a 3ª classe com representação das medições do IFC, com 5 neurônios para diâmetro, 5 neurônios para altura e 5 neurônios para produtividade – 15 neurônios. As variáveis categóricas contemplam as observações para material genético – 25 neurônios, classe de solo – 8 neurônios, e textura do solo – 4 neurônios, totalizando 37 neurônios.

Na Figura 3.4 são apresentadas, respectivamente, as dispersões residuais e os histogramas da fase generalização para a arquitetura (72-08-02) que apresentou os melhores resultados gráficos e estatísticos.

Figura 3.4 – (A) Relação entre valores observados e estimados para a densidade básica; (B) Dispersão dos resíduos - erros percentuais - nas estimativas em função dos valores observados de densidade básica; (C) Histograma dos erros nas estimativas pelas RNA



3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Densidade básica da madeira

Dentre os inúmeros fatores que contribuíram para o desenvolvimento das técnicas de melhoramento genético do *Eucalyptus* spp., a busca pela homogeneidade no crescimento, produtividade e qualidade da madeira aliadas à resistência a doenças foram aspectos decisivos para o início das técnicas de hibridação (DE ASSIS et al., 2016). Outro aspecto que torna a hibridação altamente atrativa é a possibilidade de se aumentar a densidade da madeira até níveis muito superiores aos que normalmente espécies puras suportam (DE ASSIS, 2001).

A Tabela 3.4 apresenta as variações na densidade básica da madeira entre os diferentes materiais genéticos avaliados. Nota-se que os materiais de origem seminal foram os que apresentaram os menores valores de densidade básica – destaque para G-217, seguido dos clones híbridos interespecíficos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* - destaque para GU00339. O fator comum e preponderante entre estes materiais genéticos foi a produtividade média, pois apresentaram produtividade média de $65 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, contudo, o G-217 tratava-se de um povoamento em 2ª rotação. Comportamento inverso foi observado exclusivamente para o clone GU00122 aos 5 anos de idade na região SP4, cuja densidade básica chegou a alcançar $498 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ com uma produtividade de $66 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Em geral, estes resultados seguem o padrão de normalidade esperado para a densidade básica, em que, quanto maior a taxa de crescimento das árvores e a produtividade da floresta, menor será a densidade básica da madeira; ou seja, há uma correlação negativa entre densidade e incremento (MALAN, 1991; RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993; BOWYER et al., 2003; FERNANDES et al., 2011; MENESES, 2013).

Dentre os 25 materiais genéticos cujas densidades foram estimadas pela RNA, a estimativa mais precisa, caracterizada pela menor raiz quadrada do erro médio, foi obtida para o clone GU00376, um híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com produtividade de $41 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ aos 8 anos de idade. Observa-se, no geral, que as RNA apresentaram melhores resultados de estimativas para densidade básica sem casca para os materiais genéticos clonais ($0,62 \leq \text{RMSE}(\%) \leq 3,66$) do que para os seminais ($1,53 \leq \text{RMSE}(\%) \leq 10,05$).

3.4.2 Estimativas da densidade básica da madeira pelas Redes Neurais Artificiais

As estimativas das redes na generalização foram superiores às das redes no treinamento, tanto no grau de associação ($r_{Db\bar{Db}}$) quanto na precisão (RMSE-Tabela 3.5). De forma geral, a correlação entre valores observados e estimados tanto para densidade básica com casca quanto para sem casca, apresentou um ajuste satisfatório para as redes geradas a partir de 8 neurônios na camada oculta, com previsão mais adequada para valores altos do que aos valores baixos. De acordo com Braga et al. (2000), embora um número maior de neurônios ocultos tornem a rede mais robusta e melhorem seu desempenho, ela pode vir a memorizar os padrões de treinamento em detrimento da extração de características para a generalização. Leite et al. (2016) encontraram resultados satisfatórios somente a partir de 4 neurônios na camada oculta para estimativa da densidade básica da madeira.

Os melhores resultados de estimativa - avaliados estatisticamente e nos gráficos - foram alcançados na configuração com 72 variáveis de entrada com 2 saídas, sendo uma para densidade básica com casca e outra para sem casca. Esta mesma arquitetura de variáveis de entrada foi avaliada para 1 saída: densidade com casca na rede 2.1 e densidade sem casca na rede 2.2. Ambas as derivações não apresentaram resultados estatísticos superiores, permanecendo a rede inicial – 2.0 – com o melhor ajuste

A análise da Figura 3.4-A permite inferir sobre a inexistência de tendenciosidade nas estimativas proporcionadas pela metodologia proposta. A forma de distribuição dos resíduos para os valores observados e estimados (Figura 3.4-B) mostra a eficiência das redes na estimação da densidade básica da madeira com e sem casca. Nota-se ainda que as redes apresentaram uma relativa dificuldade em estimar as menores densidades, com ocorrência de maiores resíduos para os valores entre 350 e 400 kg.m⁻³. Os histogramas dos erros percentuais das estimativas das RNA (Figura 3.4-C) demonstram uma pequena dispersão em torno de zero.

De forma geral, com as estimativas geradas pelas RNA para a densidade básica da madeira utilizando dados de manejo, edafoclimáticos do sítio e variáveis do inventário florestal contínuo pode-se obter uma precisão muito superior àquelas

usualmente obtidas em modelos de regressão calibrados com dados de amostragem não destrutiva. Segundo Thiersch et al. (2006) e Lima et al. (2007), modelos complexos usados para estimativa da densidade, como os construídos através do método Stepwise e que agregam variáveis de povoamento (dap, altura média das árvores e índice de sítio) apresentam valores de coeficiente de determinação próximos a 85% (quando utilizado em conjunto com as medidas de penetração da agulha do Pilodyn) e de 65% a 74% (quando utilizadas em conjunto com as medidas de resistência a perfuração por Resistógrafo).

3.5 CONCLUSÃO

As RNA demonstraram ser uma poderosa ferramenta para o manejo florestal. Representam uma abordagem alternativa confiável, precisa e eficiente para a estimativa da densidade básica da madeira com e sem casca utilizando dados do inventário florestal contínuo e parâmetros de manejo e edafoclimáticos do sítio. A capacidade de aprendizado da rede, por meio das bases de dados históricas de densidade básica e utilizando informações do IFC, possibilita que o conhecimento adquirido seja generalizado para outras bases de dados com informações semelhantes, sem que haja necessidade de sucessivas amostragens destrutivas.

A partir de estimativas precisas para a densidade básica da madeira, é possível prever, com antecedência, múltiplos cenários de abastecimento industrial no longo, médio e curto prazos, garantindo a sustentabilidade do manejo da floresta com foco na homogeneização do processamento da madeira, proporcionando ganhos diretos e indiretos no processo industrial.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, G., LEONARDO, J., SPAROVEK, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- ALEKSANDER I., MORTON H., 1990. *An introduction to neural computing*. Chapman Hall, London.
- ARBIB, M.A., 2003. *The handbook of brain theory and neural networks*. MIT press.

BOWYER, J. L.; HAYGREEN, J. G.; SCHMULSKY, R. 2003. Forest Products and Wood Science: An Introduction. *Fourth Edition*. Iowa State Press.

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

BULLINARIA, J. A. 2004. Introduction to neural networks. Lectures. University of Birmingham, UK. <<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inn.html>> (accessed 25.08.14).

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

CASTELLANOS, A.; BLANCO, A. M.; PALENCIA, V. 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222.

CHAUHAN, B.R.S., BIST, J.P.S., 1987. Hardboard from Unbarked *Eucalyptus* Hybrid. *Indian Forester*, 113(3), 185-190.

CIAGRO, 2016. Centro integrado de informações agrometeorológicas, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QTmedPeriodo.asp>. Acesso em: 20.10.2016.

DE ASSIS, T.F. 2001. Melhoramento para produtividade e qualidade de celulose de fibra curta. In: Resende, M.DV. (Ed.) Workshop sobre Melhoramento de Espécies Florestais e Palmáceas no Brasil. Curitiba: Embrapa Florestas. p.193-214.

DE ASSIS, T. F.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. 2016. Melhoramento genético do eucalipto. In: Silvicultura do Eucalipto no Brasil. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281408099>. Acesso em: 01/10/17.

DIAMANTOPOULOU, M. J., 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 48, 235-244.

FERNANDES, D. E.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; FERREIRA, M. Z. 2011. Influence of eucalypt hybrids clones productivity on wood basic density and kraft pulping yield. *Scientia Forestalis*, 39, 143-150.

FOELKEL, C., 2009. Papermaking properties of *eucalyptus* trees, woods and pulp fibers. *Eucalyptus Online Book Newsletter*.

HEATON, J. *Programming Neural Networks with Encog3 in Java*. 2.ed. Heaton Research, Incorporated, 2011. 240 p.

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

HAYKIN, S., 1999. *Neural Networks: a comprehensive foundation*. McMaster University Hamilton, Ontario, Canada, Pearson Education, 823p.

IMADA, A., 2014. A literature review: forest management with neural network and artificial intelligence. In *Neural Networks and Artificial Intelligence* (pp. 9-21). *Springer International Publishing*.

IPMet, 2016. Estação Meteorológica Automática IPMet, Bauru, SP. Disponível em: https://www.ipmet.unesp.br/index2.php?menu_esq1=&abre=ipmet_html/estacao/historico.php. Acesso em: 20.10.2016.

KOURTZ, P., 1990. Artificial intelligence: a new tool for forest management. *Forestry Canada*, 20: 428-437.

KRZYSIK, A.M., YOUNGQUIST, J.A., MUEHL, J.H., FRANCA, F.E., 2001. Medium density fiberboards from plantation grown *Eucalyptus saligna*. *Forest Products Journal*, Madison, 51, 47-50.

LEITE, H. G., BINOTI, D. H. B., OLIVEIRA NETO, R. R. D., LOPES, P. F., CASTRO, R. R. D., PAULINO, E. J., ... COLODETTE, J. L. 2016. Redes Neurais Artificiais para a estimação da densidade básica da madeira. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 149-154, mar.

LEK, S., DELACOSTE, M., BARAN, P., DIMOPOULOS, I., LAUGA, J., AULAGNIER, S., 1996. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. *Ecological modelling*, 90(1), 39-52.

LIMA, J. T., SARTORIO, R. C., TRUGILHO, P. F., CRUZ, C. R., VIEIRA, R. S., 2007. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica ea resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, 75, 85-93.

MALAN, F. S., 1991. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. *South African Forestry Journal*, 157,16-23.

MENESES, V.A., 2013. *Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone do Eucalyptus urophylla*. (Dissertação). UFV Universidade Federal de Lavras, Lavras, 110 pp.

MEHTÄTALO, L., MALTAMO, M., KANGAS, A., 2006. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. *Silva Fennica*, 40 (3), 501-516.

OLIVEIRA, J. D., ROSSI, M. N., M CALDERANO FILHO, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida (No. 631.498161 M297). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil).

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

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. 1980. *Text Book of Wood Technology* volume I. New York:McGraw Hill Book Company.

PENG, C.; WEN, X., 1999. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE WORKSHOP. <http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws_99-07-003.php>. (accessed 25.08.14).

PIMENTEL-GOMES. 1985. *Curso de estatística experimental*. Piracicaba-SP. ESALQ/USP.

RIEDMILLER, M.; BRAUN, H., 1993. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm, In: PROCEEDINGS OF THE IEEE, INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, IEEE. *Anais...* Press, New York, 586-591.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedências de *Eucalyptus* spp. *IPEF*. 46, 76-85.

RODRIGUES, L. A.; CARVALHO, D. A.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; BOTREL, R. T.; SILVA, E. A. 2003. Florística e estrutura da comunidade arbórea de um fragmento florestal em Luminárias, MG. *Acta Botanica Brasilica*, Porto Alegre, v. 17, p. 71-97.

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

THIERSCH, C.R., SCOLFORO, J.R., DE OLIVEIRA, A.D., REZENDE, G.D.S.P., MAESTRI, R., 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12(3), 264-278.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A densidade básica é uma das mais importantes características da madeira que afetam o processo produtivo na indústria de base florestal. Sua mensuração normalmente é conduzida nos plantios florestais por amostragem destrutiva de árvores, tarefa trabalhosa e de custo elevado.

Por conta disso, as empresas florestais recorrem normalmente a modelos estatísticos empíricos que, em muitas situações não conseguem explicar a contento a variabilidade na densidade básica da madeira devido à complexidade do problema e a limitação nos modelos utilizados. De fato, sendo a madeira o resultado da combinação da quantidade e da distribuição dos diferentes elementos anatômicos e suas inter-relações com as variáveis do sítio e do plantio, muitas deles expressas por parâmetros qualitativos (não quantitativos) – tipo de solo e sua textura, clima e material genético, por exemplo - estudar as associações destas variáveis com a densidade básica sem a incorporação dessas últimas afasta o modelo do necessário realismo biológico.

Neste trabalho foram estudadas as variações na densidade básica da madeira de uma grande área de plantios florestais de *Eucalyptus* spp. de um empresa florestal com as variáveis do sítio e do plantio. Foram utilizadas duas abordagens distintas e complementares: análise de correlações canônicas – para interpretação, na medida do possível, da influência relativa de cada uma das variáveis intervenientes no problema – e redes neurais artificiais – adequadas para encaminhamento de problemas complexos, onde existe disponibilidade de grande quantidade de dados, para estimativa da densidade básica da madeira.

No Capítulo 1, utilizando a análise de correlações canônicas, foi possível diferenciar os efeitos das variáveis originais – do sítio e do plantio – na densidade básica da madeira, observando-se variáveis com maior e menor associação com a densidade básica da madeira. As variáveis originais associadas a altas densidades básicas da madeira possuíam maiores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas e foram material genético, área vital, temperatura anual média e textura do solo; inversamente, as menores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas foram atribuídas às variáveis originais: produtividade, área basal, rotação e precipitação anual acumulada.

No Capítulo 2, redes neurais artificiais foram geradas para estimar a densidade básica da madeira a partir de dados de inventário florestal pré-corte (IPC), variáveis do sítio e do plantio. Foram geradas estimativas de densidade básica da madeira de forma rápida e eficaz, com raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 1,92% para a densidade básica com casca e de 2,01% para densidade básica sem casca e os coeficientes de correlação obtidos foram da ordem de 93%.

No Capítulo 3, redes neurais artificiais foram geradas para estimar a densidade básica da madeira a partir de dados de inventário florestal contínuo (IFC), variáveis do sítio e do plantio. Foram geradas estimativas de densidade básica da madeira de forma rápida e eficaz, com RMSE de 1,97% para a densidade básica com casca e de 2,06% para densidade básica sem casca e os coeficientes de correlação obtidos foram da ordem de 94%.

Nas duas situações estudadas com redes neurais – com base de dados do IPC e do IFC – os resultados estatísticos foram precisos, com erros muito pequenos e forte associação entre valores observados e estimados. Esta abordagem possibilita estimar a densidade básica de forma rápida e eficiente a partir de bases de dados históricas e aplicar o conhecimento adquirido pela rede a todo um cadastro de informações semelhantes pelo método de generalização.

Considerando-se a equivalência das respostas nas duas situações, o critério utilizado para seleção da base mais adequada foi os custos envolvidos na realização do inventário. O IFC que requer uma menor intensidade amostral na rede de parcelas e, portanto, menores custos, foi o recomendado.

Novos estudos poderão ser conduzidos em regiões distintas, para confirmar os principais resultados aqui obtidos e ampliar o uso de variáveis com alto grau de associação, na busca do treinamento e generalização de redes neurais cada vez mais eficientes na estimativa da densidade básica da madeira. Dessa forma, os dados de densidade básica poderão ser incorporados como importante restrição espacial no planejamento florestal tático das empresas florestais com uso industrial dessa madeira.

REFERÊNCIAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. 2013. *Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2012*. Brasília. 148 p.
- ALMEIDA, A.C., LANDSBERG, J.J., SANDS, P.J., AMBROGI, M.S., FONSECA, S., BARDDAI, S.M., BERTOLUCCI, F.L., 2004. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*. 193 (1), 167–177.
- BALIEIRO, F. C.; OLIVEIRA, W. C.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C., PICCOLO, M. C.; JACCOUD, C. F. 2008. Fertilidade e carbono do solo e uso da água pelo eucalipto numa topossequência em Seropédica, RJ. *Revista Árvore*; 32(1): 153-162.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; DI FIORE, A.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; LLOYD, J.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; PATIÑO, S.; PITMAN, N. C. A.; SILVA, N.; MARTÍNEZ, R. V. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, Oxford, v. 10, n. 5, p. 545- 562.
- BASSA, A. G. M. C.; SILVA JUNIOR; F. G.; SACON, V. M. 2007. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids. *Scientia Florestalis*, v. 51, n. 75, p. 19 - 29.
- BELINI, U. L., TOMAZELLO FILHO, M., PEREZ CHAGAS, M., TARCÍSIO DA SILVA OLIVEIRA, J. 2008. Alterações na estrutura anatômica da madeira de cavacos de *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento para a confecção de painéis MDF. *Revista Árvore*, 32(3).
- BERNARD, M., 2003. *Eucalyptus: a strategic species for forests*. Rev. For. Fr. 55 (2), 141–154.
- BERGÈS, L.; NEPVEU, G.; FRANC, A., 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, 255 (3/4), 567-579.
- BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. 2009. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de Redes Neurais Artificiais para estimar volume de árvores de Eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1133-1139.
- BINOTI, M. L. M. S., 2010. *Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto*. 54f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. DA S.; LEITE, H. G. 2014 (a). Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Ciência da Madeira*, v.5, n.1, p.58-67.

BINOTI, M. L. M. S., BINOTI, D. H. B., LEITE, H. G., SILVA, A. A. L., PONTES, C. 2014 (b). Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. *Revista Árvore*, 38(4).

BINKLEY, D., STAPE, J. L., BAUERLE, W. L., RYAN, M. G. 2010. Explaining growth of trees and stands: changes in efficiency of light use through a rotation of *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 259, n. 9, p.1704-1713.

BOWERSOX, T.W. WARD, W.W., 1972. Prediction of oak site index in the ridge and valley region of Pennsylvania. *Forest science*, Washington, 18(3): 192-5

BOURIAUD, O., BRÉDA, N., LE MOGUEDEC, G., NEPVEU, G. 2004. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees*, 18(3), 264-276.

BRAGA, F.D.A., VALE, F., MUNIZ, J., 1995. Movimentação de nutrientes no solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto, em função de doses de gesso e níveis de irrigação. *Bras. Ci. Solo*, 19, 69-77.

BRAGA, A. DE P.; CARVALHO, A. P. de L. F. DE; LUDEMIR, T. B., 2000. *Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações*. 262p.

CAMPOE, O. C., MUNHOZ, J. S., ALVARES, C. A., CARNEIRO, R. L., DE MATTOS, E. M., FERREZ, A. P. C., STAPE, J. L. 2016. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 380, 149-160.

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

CAMPINHOS JR., E., 1999. Sustainable plantations of high-yield *Eucalyptus* trees for production of fiber: the Aracruz case. *New Forest*. 17, 129–143.

CARRERO, O.; STAPE, J. L.; ALLEN, L.; ARREVILLAGA, M.; LADEIRA, M. 2011. Monitoring silvicultural and genetic improvements of *Eucalyptus* plantation using inventory data. In: IUFRO CONFERENCE ON IMPROVEMENT AND CULTURE OF *EUCALYPTUS*, 1., 2011, Porto Seguro. *Proceedings...* Piracicaba: ESALQ. p.167-170.

CASTELLANOS, A., BLANCO, A.M., PALENCIA, V., 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222.

CASTRO, R.V.O. Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares. 2011. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CASTRO, V. R., SURDI, P. G., JUNIOR, C. R. S., TOMAZELLO FILHO, M., CHAIX, G., LACLAU, J. P. 2017. Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da

disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. *Ciência Florestal*, 27(3), 1017-1027.

CERALDI, C.; MORMONE, V.; RUSSO ERMOLLI, E. 2001. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. *Materials and structures*, 34(1), 59-64.

COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., NEVES, T. A., PROTÁSIO, T. D. P.; SÁ, V. A. D. 2013. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. *Cerne*, 19(1), 27-34.

CORRÊA NETO, T. A., ANJOS, L. H. C., PEREIRA, M. G., AMORIM, H. B., JACCOUD, C. F. S. 2007. Atributos edafoambientais e parâmetros dendrométricos de plantios de eucalipto em uma topossequência no campus da UFRRJ, Seropédica-RJ. *Ciência Florestal*; 17(1): 43-51.

COSTA, A. C. S., LEAL, C. S., SANTOS, L. C., CARVALHO, A. M. M. L., OLIVEIRA, A. C., PEREIRA, B. L. C. 2017. Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. *Revista Ciência da Madeira* 8 (1).

DEBELL, D. S., KEYES, C. R., GARTNER, B. L. 2001. Wood density of *Eucalyptus saligna* grown in Hawaiian plantations: effects of silvicultural practices and relation to growth rate. *Australian Forestry*, 64(2), 106-110.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 48, n.3, p. 235-244.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2012. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2(4), 190-197.

DOWNES, G.M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R.; MUNERI, A., 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties. Melbourne: CSIRO. 126p

FERREIRA, J. M. A.; STAPE, J. L. 2009. Productivity gains by fertilization in *Eucalyptus urophylla* clonal plantations across gradients in site and stand conditions. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, Menlo Park, v. 71, n. 4, p. 253-258.

FRITTS, H.C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976. 567 p.

GANTZ, C.H. 2002. *Evaluating the efficiency of the Resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species*. 2002. 78p. Dissertação (Mestrado) – North Carolina State University, Raleigh.

GAVA, J. L., GONÇALVES, J. L. D. M. 2008. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. *Scientia Agricola*, 65(3), 306-313.

GONÇALVES, J.L.M., BARROS, N.F., 1999. Improvement of site productivity for shortrotation plantations in Brazil. *Bosque* 20, 89–106.

GONÇALVES, J. D. M., MELLO, S. D. M., 2000. O sistema radicular das árvores. *Nutrição e fertilização florestal. IPEF, Brazil*, 219-267.

GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACLAU, J.P., SMETHURST, P., GAVA, J.L., 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 193, 45–61.

GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACLAU, J.-P., BOUILLET, J.-P., RANGER, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fastgrowing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests* 70, 105–118.

GONÇALVES, J. L. M., ALVARES, C. A., HIGA, A. R., SILVA, L. D., ALFENAS, A. C., STAHL, J., ... BOUILLET, J. P. D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27.

GÖRGENS, E. B., LEITE, H. G., GLERIANI, J. M., SOARES, C. P. B., CEOLIN, A. 2014. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 38(2).

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. 2005. *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman. 593 p.

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

HAKAMADA, R.E.; LEMOS, C.C.Z. 2010. Evolução da produtividade da IP: Influência de manejo e do melhoramento genético. In: WORKSHOP DE MELHORAMENTO, 6., REUNIÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PTSM, 61. Botucatu. *Anais...* Botucatu,

HAKAMADA, R. E. 2012. *Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultura em povoamentos clonais de Eucalyptus* (Dissertação), Universidade de São Paulo. Piracicaba

HAKAMADA, R. E., STAPE, J. L., LEMOS, C. C. Z. D., EMANUEL, A., ALMEIDA, A., SILVA, L. F. 2015. Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 43, n.105, p. 27-36.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual IBÁ 2017. São Paulo, 2017. 80 p.

JACOBY, G. C. 1989. Overview of tree-ring analysis in tropical regions. *IAWA Bulletin NS*, Utrecht, v. 10, n. 2, p. 99-108.

KAGEYAMA, P. Y.; VENCOVSKY, R. 1983. Variação genética em progênes de uma população de *E. grandis*. *IPEF*, Piracicaba, n. 24, p. 9-26.

LANDSBERG, J., SANDS, P. 2011. Physiological ecology of forest production: principles, processes, and models. Amsterdam: *Elsevier Academic Press*, ed. 1, v. 4, 331 p.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RIMA, 2000.

LEITE, H. G.; GUIMARÃES, D. P.; CAMPOS, J. C. C. 1995. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. *Revista Árvore*, v.19, n.1, p.1-21.

LEITE, F.P., BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., SANS, L.M.A., FABRES, A.S., 1997. Crescimento de *E. grandis* em diferentes densidades populacionais. *Rev. Árvore* 2, 313–321.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. D., 2002. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. *Revista Árvore*, 26(3), 321-328.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GUIMARÃES, D. P.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R. 2010. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. *Revista Árvore*, v.34, n.2, p.305-311.

LIMA, J. T., SARTORIO, R. C., TRUGILHO, P. F., DA CRUZ, C. R., VIEIRA, R. D. S. 2007. Use of the resistograph for *Eucalyptus* wood basic density and perforation resistance estimative. *Scientia Forestalis*, 35(75), 85-93.

Leles, P.S.S., Reis, G.G., Reis, M.G.F., Morais, E.J., 2001. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. *Sci. For.* 59, 77–87.

LEMOS, C.C.Z., 2012. Improvements, Test and Use of the 3-PG Model in *Eucalyptus* Clonal Plantation In Northeast of Sao Paulo State (Tese). Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil, p. 171.

LOBÃO MS, LÚCIA RMD, MOREIRA MSS; GOMES A. 2004. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Revista Árvore*. 28(6): 889-894.

MANLY, B. F. J. 2004. *Multivariate statistical methods: a primer*. 3rd ed. London: Chapman & Hall/CRC. 214 p.

MARCATTI, G. E.; RESENDE, R. T.; RESENDE, M. D. V.; RIBEIRO, C. A. A.; DOS SANTOS, A. R.; DA CRUZ, J. P.; LEITE, H. G. 2017. GIS-based approach applied to optimizing recommendations of *Eucalyptus* genotypes. *Forest Ecology and Management*, v.392, 144- 153.

- MAURI, R., DA SILVA OLIVEIRA, J. T., TOMAZELLO FILHO, M., ROSADO, A. M., PAES, J. B., CALEGARIO, N. 2015. Wood density of clones of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* in different conditions of growth. *Floresta*, 45(1), 193-202.
- MELLO, J. M., DINIZ, F. S., DE OLIVEIRA, A. D., SCOLFORO, J. R. S., JÚNIOR, F. W. A., THIERSCH, C. R. 2009. Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*. *Floresta*, v. 39, n. 1.
- McKENZIE, H. M.; SHELBOURNE, C. J. A.; KIMBERLEY, M. O.; McKINLEY, R. B.; BRITTON, R. A. J. 2003. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products: 2., predicting product quality from tree, increment core, disc and 1-m billet properties. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 33, n. 1, p. 79-113, Feb.
- MOULIN, J. C., ROCHA, M. F. V., ARANTES, M. D. C., BOSCHETTI, W. T. N., DE JESUS, M. S., TRUGILHO, P. F. 2017. Influência do espaçamento de plantio e irrigação na densidade e na massa seca em espécies de *Eucalyptus*. *Nativa*, 5(5), 367-371.
- MUNERI, A.; RAYMOND, C.A. 2000. Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for basic density, pilodyn penetration and stem diameter in *Eucalyptus globulus*, *Forest Genetics* 7(4): p. 317-328.
- MYBURG, A.A., GRATTAPAGLIA, D., TUSKAN, G.A., HELLSTEN, U., HAYES, R.D., et al., 2014. The genome of *Eucalyptus grandis*. *Nature* 510, 356–362.
- NASCIMENTO, T. M., MONTEIRO, T. C., Ricardo, P., HEIN, G.... 2015. Efeito do espaçamento na densidade e retratibilidade de *Eucalyptus*. In: II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. *Anais...* Belo Horizonte.
- NYLAND, R. D. 2007. *Silviculture: concepts and applications*. 2.ed. Long Grove: Waveland press. 682 p.
- NILSSON, U., ALLEN, H. L. 2003. Short-and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 175(1), 367-377.
- OLIVEIRA, G. M. V.; MELLO, J. M. DE; TRUGILHO, P. F.; SCOLFORO, J. R. S.; ALTOÉ, T. F.; SILVA NETO, A. J. DE; OLIVEIRA, A. D. de. 2012. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do Estado de Minas Gerais. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, abr./jun.
- OLIVEIRA, Y. M. M. et al. 2016. Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. *Embrapa Florestas-Livro científico*.
- OTEGBEYE, G. O., KELLISON, R. C.. 1980. Genetics of wood and bark characteristics of *Eucalyptus viminalis*. *Silvae Genetica*, v. 29, n. 1, p. 27-31.

ÖZÇELİK, R., DIAMANTOULOPOULOU, M. J., BROOKS, J. R.; WIANT Jr., H.V., 2010. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. *Journal of Environmental Management* 91, 742-753.

PALLET, R., N.; SALE, G. 2004. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1, p. 33-43.

PENG, C.; WEN, X., 1999. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE WORKSHOP. Disponível em: <http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws_99-07-003.php>. Acesso em: 25.08.14.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. 2004. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* s. T. Blake. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909.

RALSTON, C.W., 1964. Evaluation of forest site productivity. In: INTERNATIONAL REVIEW OF FOREST RESEARCH, New York, 1964. Proceedings. New York, Academic Press, v.1, p.171-201.

RALSTON, C.W., 1967. Recognition and mapping of site types for afforestation. In: FAO WORLD SYMPOSIUM ON MAN-MADE FOREST AND THEIR INDUSTRIAL IMPORTANCE, Canberra, 1967. Proceedings. Canberra, v.1, p.172-87.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. 1998. Where to shoot your pilodyn: within three variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests*, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221.

RATUR, A., KOTHIYAL, V., UNIYAL, K. K., SEMALTY, P. D. 2012. Development and evaluation of models for specific gravity of *Eucalyptus tereticornis* wood by fourier transformed near infrared spectroscopy and partial least squares regression analysis. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 9(1), 40-45.

REIS, G. G., REIS, M. D. G. F., FONTAN, I. D. C. I., MONTE, M. A., GOMES, A. N., DE OLIVEIRA, C. H. R., 2006. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. *Revista Árvore*, 30(6), 921-931.

RIBEIRO, F.A.; ZANI FILHO, J., 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedências de *Eucalyptus* spp. *IPEF*. 46, 76-85.

RIBEIRO, M. D. D. S. B., JORGE, L. A. B., MISCHAN, M. M., DOS SANTOS, A. L., BALLARIN, A. W. 2017. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. *Ciência Florestal*, 27(1), 31-45.

RIEDMILLER, M.; BRAUN, H. 1993. A direct adaptive method for faster back propagation learning: the rprop algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks*, v.1, p.586-591.

ROCHA, S. P., PREVEDELLO, J., REINERT, D. J., FLEIG, F. D., VOGELMANN, E. S., SOARES, J. C. W., HEINZ, B. B. 2015. Soil physical properties and *Eucalyptus* growth planted after different tillage methods. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 965-977, dez.

ROQUE, R., TOMAZELLO FILHO, M. 2009. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. Radial variation of the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees from different climatic and management conditions in Costa Rica. *Scientia*, 37(83), 273-285.

SANDERCOCK, C. F., SANDS R., RIDOUTT, B. G., WILSON, L. F., HUDSON, I. 1995. Factors determining wood microstructure in *Eucalypts*. In: Potts BM, BORRALHO, N. M. G., REID, J. B., CROMER, R. N., TIBBITS, W. N., RAYMOND, C. A. (EDS) *Eucalypt plantations: improving fibre yield, quality*. CRC-THF Hobart, Australia, pp 128–135

SANDO, T.; MUSSA, R.; SOBANJO, J.; SPAINHOUR, L., 2005. Advantages and disadvantages of different crash modeling techniques. *J. Saf. Res. Traffic Records Forum Proc.* 36, 485–487.

SEGHATOLESLAMI, M. J.; KAFI, M.; MAJIDI, E. 2008. Effect of drought stress at different growth stages on yield and water use efficiency of five proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Pakistan Journal of Botany*, Karachi, v. 40, n. 4, p. 1427-1432.

DA SILVA, R. M. L., HAKAMADA, R. E., BAZANI, J. H., OTTO, M. S. G., STAPE, J. L. 2016. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in *Eucalyptus* Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. *Forests*, 7(6), 117.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; DE OLIVEIRA FILHO, P. C. 2009. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. *AMBIÊNCIA*, 4(3), 529-549.

SCOLFORO, H. F., SCOLFORO, J. R. S., STAPE, J. L., MCTAGUE, J. P., BURKHART, H., MCCARTER, J., ... SARTORIO, R. C. 2017. Incorporating rainfall data to better plan eucalyptus clones deployment in eastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 391, 145-153.

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

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região com alta variabilidade pluviométrica. *Scientia Florestalis*, n.58, p.41-48, 2000.

- STAPE, J. L.; ROCHA, J. C.; DONATTI, Z. 2006 *Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz: 2000 a 2005*. 1.ed. Piracicaba: IPEF, 25p.
- STAPE, J. L., BINKLEY, D., RYAN, M. G., FONSECA, S., LOOS, R. A., TAKAHASHI, E. N., ... LIMA, A. M. 2010. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1684-1694.
- THIERSCH, C. R., SCOLFORO, J. R., DE OLIVEIRA, A. D., REZENDE, G. D. S. P., MAESTRI, R., 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12(3), 264-278.
- TOMAZELLO FILHO, M. 2006. *Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenhoff de árvores de Eucalyptus grandis x urophylla*. 2006. 146 f, (Tese) Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. 2003. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. *Cerne*, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80.
- VELLASCO, M. M. B. R. Redes Neurais Artificiais. 2007. Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www2.ica.ele.puc-rio.br/Downloads/33/ICA-introdu%C3%A7%C3%A3o%20RNs.pdf> . Acesso em: 23 de abril de 2017.
- WU, S. J.; XU, J. M.; Li, G. Y.; RISTO, V.; LU, Z. H.; LI, B. Q.; WANG, W. 2010. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, 21(1), p. 68-72.
- YURTSEVEN, I., ZENGİN, M., 2013. Neural network modelling of rainfall interception in four different forest stands. *Annals of Forest Research* 56(2): 351-362.