

RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA CASTRO

**MODELAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA UMA FLORESTA
ESTACIONAL SEMIDECIDUAL UTILIZANDO REDES NEURAIIS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C355m
2012

Castro, Renato Vinícius Oliveira, 1986-

Modelagem de árvore individual para uma floresta estacional
semidecidual utilizando redes neurais / Renato Vinícius
Oliveira Castro. – Viçosa, MG, 2012.
viii, 105f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Carlos Pedro Boechat Soares.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Florestas tropicais. 2. Florestas - Medição. 3. Redes
neurais (Computação). 4. Competição (Biologia).
5. Levantamentos florestais. 6. Florestas - Administração.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.92288

RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA CASTRO

**MODELAGEM DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA UMA FLORESTA
ESTACIONAL SEMIDECIDUAL UTILIZANDO REDES NEURAIIS**

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

APROVADA: 21 de dezembro de 2012.

 _____ Helio Garcia Leite (coorientador)	 _____ Gilciano Saraiva Nogueira
 _____ Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro	 _____ Márcio Leles Romarco de Oliveira
 _____ Agostinho Lopes de Souza (Presidente da Banca)	

AGRADECIMENTOS

À Deus, por cada detalhe que vem planejando para a minha vida.

À Ana Flávia e Ana Clara, minhas grandes paixões. Se não fosse por vocês, jamais realizaria este sonho. Vocês me inspiram para lutar e vencer. Espero retribuir tudo de bom que vocês proporcionam na minha vida sendo o melhor marido e pai do mundo.

Aos meus pais Lia e Geraldo, pelo apoio para que os meus sonhos se concretizassem.

Aos irmãos Marlon e Anderson, pelo incentivo e apoio nos meus estudos.

À Cida e José Maria pelo apoio incondicional, e por me receberem tão bem e suas famílias.

Aos amigos de Viçosa, pela agradável convivência nestes últimos quatro anos de mestrado e doutorado e por todas as ajudas... Ricardo Gaspar, Lívia Figueiredo, Carlos Torres, Fabrício Silva, Gustavo Marcatti, Daniel Brianezi, Camila Bras, Daniel Silveira e Ana Paula Vilela.

Aos amigos de João Monlevade e de Diamantina, por sempre torcerem pelo meu sucesso.

Um agradecimento especial aos amigos de Diamantina que continuaram a jornada de estudos em Viçosa, pelo apoio e companheirismo. Glauciana Ataíde, Júlia Costa, Carlos Alberto, Bruna Dias, Maria Fernanda, Regina Gomes, Anna Carolina Picancio, Cibele Chaves, Anne Correia e Danilo Barros.

Ao professor Carlos Pedro Boechat Soares pela valiosa orientação, sempre muito bem direcionada, pelos permanentes incentivos, aconselhamentos e pela confiança depositada antes e durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela dedicação e exemplo de profissional.

Ao professor Helio Garcia Leite, pela confiança, dedicação, e apoio em todos os momentos e por não medir esforços para me ajudar.

Ao professor Agostinho Lopes de Souza pelas valiosas sugestões e incentivo, mas principalmente por me fazer enxergar o manejo florestal muito além daquilo descrito em livros.

Ao professor Gilciano Saraiva Nogueira, pela amizade, estímulo e importantes sugestões em meus trabalhos. Serei eternamente grato pelas oportunidades que você me proporcionou.

Ao professor Márcio Leles Romarco de Oliveira pela contribuição em minha vida profissional, em especial neste trabalho.

Ao professor Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro por aceitar participar da banca de defesa e pelos ensinamentos durante a minha formação acadêmica.

À Professora e amiga Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pelo apoio para continuar os meus estudos em Viçosa.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pelo acolhimento, parceria e principalmente pela amizade.

À Rosimeire Cavalcante dos Santos e a Glauciana da Mata Ataíde, por acreditarem no meu trabalho e pelas produtivas parcerias profissionais.

À Fabrina Bolzan Martins pelas contribuições durante o meu exame de qualificação do doutorado e pela valiosa troca de conhecimentos em nossas pesquisas.

Aos secretários da pós-graduação Ritinha e Alexandre e aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, Neuzinha, Noêmia e Chiquinho, por sempre estarem dispostos a ajudar.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade de desenvolver esta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA CASTRO, filho de Geraldo Martins Castro e Maria Hélia de Oliveira Martins Castro, nasceu em São Domingos do Prata, Minas Gerais, aos 07 de abril de 1986.

Residiu em João Monlevade até ingressar no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina, em julho de 2004. Obteve o título de Engenheiro Florestal em dezembro de 2008.

Em agosto de 2009 ingressou no programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Ciência Florestal em fevereiro de 2011.

Em fevereiro de 2011 iniciou o doutorado, também pelo programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFV, submetendo a defesa de tese, para obtenção do título de Doutor, em dezembro de 2012.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
CAPÍTULO I.....	5
ÍNDICES DE COMPETIÇÃO EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL DE UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. Índices de competição.....	10
2.2. Avaliação dos índices de competição	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4. CONCLUSÕES	25
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
CAPÍTULO II.....	31
EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMAÇÃO DE MORTALIDADE EM UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL	31
1. INTRODUÇÃO	32
2. MATERIAL E MÉTODOS	36
2.1. Dados	36
2.2. Índices de competição.....	38
2.3. Mortalidade.....	38
2.4. Treinamento das redes neurais artificiais	39
2.5. Avaliação do treinamento das redes neurais artificiais	40

2.6. <i>Generalização das redes neurais artificiais</i>	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4. CONCLUSÕES	52
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
CAPÍTULO III	58
PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA DE ÁRVORES EM UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL POR MEIO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS	58
1. INTRODUÇÃO	59
2. MATERIAL E MÉTODOS	61
2.1. <i>Dados</i>	61
2.2. <i>Índices de competição para a projeção do dap, altura total e altura do fuste</i>	63
2.3. <i>Treinamento das redes neurais artificiais para projeção do dap, altura total e altura do fuste</i>	64
2.4. <i>Avaliação das redes neurais artificiais para projeção do dap, altura total e altura do fuste</i>	65
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4. CONCLUSÕES	79
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
CAPÍTULO IV	83
VALIDAÇÃO DE UM MODELO COMPLETO EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL	83
1. INTRODUÇÃO	84
2. MATERIAL E MÉTODOS	86
2.1. <i>Dados</i>	86
2.2. <i>Validação do modelo completo de árvore individual (projeção)</i>	87
2.3. <i>Índices de competição</i>	88
2.4. <i>Sub-modelo de mortalidade</i>	89
2.5. <i>Sub-modelo de crescimento</i>	90
2.6. <i>Sub-modelo de ingresso</i>	90
2.7. <i>Avaliação da projeção aplicando o modelo completo de árvore individual</i>	91
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4. CONCLUSÕES	100
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
CONCLUSÕES GERAIS	105

RESUMO

CASTRO, Renato Vinícius Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2012. **Modelagem de árvore individual para uma Floresta Estacional Semidecidual utilizando redes neurais.** Orientador: Carlos Pedro Boechat Soares. Coorientadores: Helio Garcia Leite e Agostinho Lopes de Souza.

Este estudo teve como objetivos desenvolver um modelo completo em nível de árvore individual para um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana utilizando redes neurais artificiais (RNA) e validar a sua aplicação. Dados provenientes de dez parcelas permanentes em um fragmento florestal de 17 ha no município de Viçosa, MG, em estágio médio de sucessão ecológica, monitoradas durante 14 anos (1994, 1997, 2000, 2004 e 2008) foram utilizados para este propósito. O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois grupos: 1) grupo de treinamento das redes, composto por seis parcelas e totalizando 3.556 casos nas cinco medições, sendo observados 231 casos de mortalidade e 238 casos de ingresso, e 2) grupo de validação do modelo, composto por quatro parcelas, totalizando 2.062 casos, sendo observados 181 casos de mortalidade e 146 casos de ingresso. O trabalho foi dividido em quatro capítulos onde, no capítulo I, foram avaliados diferentes índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes da distância, sendo selecionados aqueles melhores para os estudos de crescimento e mortalidade nos capítulos posteriores. Nos capítulos II e III foram avaliados e comparados diferentes arquiteturas e tipos de redes neurais para estimativa da mortalidade regular das árvores, bem como para projeção do diâmetro, altura total e do fuste. No capítulo IV, realizou-se a validação das redes empregando-se o conjunto de dados independentes. Além das redes selecionadas considerou-se a taxa média de ingresso em cada período de medição, no primeiro grupo de dados, na projeção da estrutura da floresta (validação). Após as análises, observou-se que, de maneira geral, os índices de competição foram correlacionados com o crescimento e probabilidade de mortalidade das árvores. Verificou-se, também, a eficiência das redes neurais na estimação da mortalidade das árvores e para a projeção do crescimento, sendo obtidas estimativas precisas. Na validação, projetou-se a mortalidade, o crescimento e o ingresso da primeira medição (1994) até o ano de 2008, os quais foram comparados aos valores observados. O modelo em nível de árvore individual foi eficiente na simulação do crescimento e produção florestal em todos os níveis de

detalhamento (povoamento total, distribuição diamétrica e de altura e em nível de árvore individual). Os resultados confirmaram o potencial de utilização de modelos em nível de árvore individual por meio de redes neurais artificiais em florestas naturais estruturalmente complexas, como é o caso da Floresta Estacional Semidecidual Montana.

ABSTRACT

CASTRO, Renato Vinícius Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2012. **Modeling individual tree for an Semideciduous Forest using neural network.** Advisor: Carlos Pedro Boechat Soares. Co-advisors: Helio Garcia Leite and Agostinho Lopes de Souza.

This study aimed to develop a complete model in individual tree basis for a fragment of Semideciduous Montana forest using artificial neural networks (ANN) and validate their application. Data from ten permanent plots in a forest of 17 ha in Viçosa, MG, at the intermediate stage of ecological succession, monitored for 14 years (1994, 1997, 2000, 2004 and 2008) were used for this purpose. The data set was randomly divided into two groups: 1) training networks group, consisting of six parcels totaling 3,556 cases at five measurements, observed 231 cases of death and 238 cases of ingrowth, and 2) the validation model group, consisting of four parcels, totaling 2,062 cases, with 181 cases of death and 146 cases of ingrowth. The work was divided into four chapters where, in Chapter I, we evaluated different competition indexes independent, dependent and semi-independent of distance, and selected those best for studies of growth and mortality in later chapters. In Chapters II and III were evaluated and compared different types and architectures of neural networks to estimate mortality regular trees, as well as projection of diameter, total height and bole height. In Chapter IV, there was the validation of networks employing the set of independent data. Besides the selected networks was considered the average rate at each measurement period, the first data group, the projection of the forest structure (validation). The analysis showed that, overall, the competition indexes were correlated with the probability of mortality and growth of trees. There was also verified that the neural networks efficiency in the estimation of tree mortality and the growth projection, accurate estimates are obtained. In validation, designed to mortality, growth and ingrowth of the first measurement (1994) by the year 2008, which were compared to the observed values. The model for individual tree basis was efficient in simulating forest growth and yield at all levels of detail (stand level, diameter and hight distribution level and individual tree level). The results confirmed the potential use of individual tree basis models through artificial neural networks in natural forests structurally complex, as is the case of the Semideciduous Montana Forest.

INTRODUÇÃO GERAL

A Mata Atlântica, além de ser um dos *hotspots* de biodiversidade do planeta, é reconhecida como “patrimônio nacional” pela Constituição Federal. É o segundo grande complexo de florestas tropicais em extensão da América do Sul e está localizada predominantemente no território brasileiro (TABARELLI et al., 2005, RIBEIRO et al., 2009).

Este importante ecossistema brasileiro apresenta elevada biodiversidade, devido às variações de relevos, solos e regimes pluviométricos (RAMBALDI et al., 2003; PINTO et al., 2006), mas hoje se apresenta como um mosaico composto por pequenos fragmentos, principalmente nas regiões sul e sudeste (TABARELLI et al., 2005; ANUÁRIO MATA ATLÂNTICA, 2012, LIMA, 2012).

As principais pesquisas em florestas da Mata Atlântica são relacionadas florística e fitossociologia, ecofisiologia, propagação e conservação de plantas, fenologia e colheita de sementes, plantas medicinais e biologia animal, entretanto, ainda são poucas os estudos relacionados à modelagem do crescimento e mortalidade de árvores.

Os modelos de crescimento e produção são de grande importância quando usados na predição do desenvolvimento futuro do povoamento florestal. Permitem simular a dinâmica natural, de modo a prever a sua produção ao longo do tempo, sob hipóteses de exploração ou sujeito a agentes físicos e bióticos (VANCLAY, 1994).

Atualmente, no Brasil, maiores desenvolvimentos na modelagem do crescimento e produção estão relacionados a plantios, seja para apenas uma espécie ou para um pequeno grupo de espécies. A aplicação de modelos mais detalhados em florestas naturais heterogêneas ainda é restrita.

Os métodos mais empregados para predição da produção de florestas naturais no Brasil são a Cadeia de Markov e o método de razão de movimentação

(AUSTREGÉSILO et al., 2004; TEIXEIRA et al., 2007; STEPKA et al., 2010), cujas estimativas são obtidas em nível de classes diamétricas ou de povoamento total.

Embora estas técnicas consigam prever com precisão o crescimento, ingresso e mortalidade, elas não são capazes de oferecerem entendimento suficiente em nível de árvore, como, por exemplo, a competição entre árvores, o efeito de tratamentos silviculturais sobre o crescimento das árvores, entre outros.

Neste sentido, destacam-se os modelos em nível de árvore individual, uma vez que simulam o crescimento e estimam a mortalidade em nível de árvore (DAVIS e JOHNSON, 1987), além do ingresso de novas árvores (HASENAUER, 2000). No entanto ainda são escassos os estudos sobre estes modelos em florestas naturais tropicais brasileiras.

Desta forma, considerando a necessidade de estudos na área de modelagem de crescimento e produção de florestas naturais tropicais em nível de árvore individual, desenvolveu-se este estudo cujos objetivos foram: avaliar índices de competição para estudo de mortalidade e crescimento de árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, no município de Viçosa - MG; desenvolver modelos de mortalidade, crescimento diamétrico e de altura para árvores individuais por meio de redes neurais artificiais; aplicar e avaliar o modelo completo de crescimento e produção em nível de árvore individual utilizando dados independentes.

Para atingir os objetivos propostos a tese foi estruturada em quatro capítulos, sendo que cada capítulo encontra-se na forma de artigo científico, conforme apresentado a seguir:

- **Capítulo I:** “Índices de competição em nível de árvore individual em uma Floresta Estacional Semidecidual”.

- **Capítulo II:** “Eficiência de redes neurais artificiais na estimação de mortalidade em uma Floresta Estacional Semidecidual”.

- **Capítulo III:** “Projeção do diâmetro e altura de árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual por meio de redes neurais artificiais”.

- **Capítulo IV:** “Validação de um modelo completo em nível de árvore individual para uma Floresta Estacional Semidecidual”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO MATA ATLANTICA 2012. **Avanços, oportunidades de desafios**. Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. São Paulo, 2012.

AUSTREGÉSILO, S.L.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, J.A.A.; SOUZA, A.L.; MEUNIER, I.M.J.; SANTOS, E.S. Comparação de métodos de prognose da estrutura diamétrica de uma floresta estacional semidecidual secundária. **Revista Árvore**, v.28, n.2, p.227-232, 2004.

DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N. **Forest management**. New York: McGraw-Hill, 3. ed., 1987. 790 p.

HASENAUER, H. Princípios para a modelagem de ecossistemas florestais. **Ciência & Ambiente**, n.20, p.53-69, 2000.

LIMA, C.M.G. **Modelagem de transição florestal da Mata Atlântica**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PINTO, L.P.; BEDÊ, L.; PAESE, A.; FONSECA, M.; PAGLIA, A.; LAMAS, I. Mata Atlântica Brasileira: os desafios para conservação da biodiversidade de um *hotspot* mundial. In: ROCHA, C.F.D.; BERGALLO, H.G.; SLUYS, M.V.; ALVES, M.A.S. (Ed.). **Biologia da conservação**: essências. São Carlos: RiMa, p.91-118, 2006.

RAMBALDI, D.M.; MAGNANI, A.; ILHA, A.; LARDOSA, E.; FIGUEIREDO, P.; OLIVEIRA, R.F. **A reserva da biosfera da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro**. Caderno 22, 2a edição. CETESB, São Paulo, 61p. 2003.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSENA, A.C.; PONZONIB, F.J.; HIROTAC, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v.142, n.6, p.1141-1153, 2009.

STEPKA, T.F.; DIAS, A.N.; FILHO, A.F.; MACHADO, S.A.; SAWCZUK, A.R. Prognose da estrutura diamétrica de uma Floresta Ombrófila Mista com os métodos

razão de movimentos e matriz de transição. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, n.64, p.327-335, 2010.

TABARELLI, M.; PINTO, L.P.; SILVA, J.M.; HIROTA, M.M.; BEDÊ, L.C. Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica brasileira. **Megadiversidade**, v.1, n.1, p.132-138, 2005.

TEIXEIRA, L.M.; CHAMBERS, J.Q.; SILVA, A.R.; LIMA, A.J.N.; CARNEIRO, V.M.C.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Projeção da dinâmica da floresta natural de Terra-Firme, região de Manaus-AM, com o uso da cadeia de transição probabilística de Markov. **Acta Amazônica**, v.37, n.3, p.377-384, 2007.

VANCLAY, J.K. **Modeling Forest growth and yield: applications to mixed tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312 p.

CAPÍTULO I

ÍNDICES DE COMPETIÇÃO EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL DE UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL

RESUMO – Este estudo teve como objetivo avaliar a correlação entre diferentes índices de competição com o crescimento diamétrico (Δdap), crescimento em altura (ΔHt) e probabilidade de mortalidade (Pm) em árvores individuais de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana em estágio médio de sucessão ecológica. Foram avaliadas três categorias de índices, sendo cinco índices independentes (IID), dois dependentes (IDD) e quatro índices semi-independentes da distância (ISD). Para os índices independentes e semi-independentes da distância foram avaliados dois raios de vizinhança: seis e três metros. Os dados empregados foram provenientes de dez parcelas monitoradas durante 14 anos, em cinco ocasiões, localizados no município de Viçosa, Minas Gerais. Os índices de competição foram avaliados a partir de análises gráficas e coeficientes de correlações lineares entre cada índice e as variáveis Δdap , ΔHt e Pm . As correlações foram calculadas para todas as espécies em conjunto e para 36 espécies isoladamente, que apresentaram densidade maior ou igual a 10 indivíduos. De maneira geral, todas as categorias de índices de competição (IID, IDD e ISD) apresentaram índices correlacionados com o crescimento e mortalidade de árvores individuais, com superioridade dos índices semi-independentes da distância. Em relação ao raio de competição, para os índices dependentes e semi-independentes, foi observado superioridade para o raio de 6 m, para todas as variáveis. Assim sendo, observou-se a potencialidade de todas as categorias de índices de competição em estudos de crescimento e produção em nível de árvore individual em Floresta Estacional Semidecidual Montana, em nível médio de sucessão ecológica. Os resultados servirão de subsídio para a inclusão de índices de competição em modelos de crescimento e produção em nível de árvore individual em florestas inequiduais, especialmente em Floresta Estacional Semidecidual Montana, em nível médio de sucessão ecológica.

Palavras-Chave: Floresta Estacional Semidecidual Montana, índices dependentes da distância, índices independentes da distância, índices semi-independentes da distância, correlação linear.

1. INTRODUÇÃO

Índices de competição são importantes para a modelagem de crescimento e produção em florestas tropicais (FOLI, 1993). O emprego desses índices permite a determinação do nível de supressão de cada árvore em relação às suas competidoras (MARTINS et al., 2011).

Eles estão entre as variáveis explicativas mais utilizadas para se prever o crescimento e a mortalidade de árvores individuais (RADTKE et al., 2003, PELTONIEMI e MÄKIPÄÄ, 2011). O efeito negativo da competição sobre o crescimento e mortalidade das árvores é confirmado por diversos autores (WYKOFF, 1990; QUICKE et al., 1994; BIGING e DOBBERTIN, 1995; HASENAUER e MONSERUD, 1996; MONSERUD e STERBA, 1996; STERBA et al., 2002). Porém, a avaliação da competição constitui um problema contínuo na área florestal, devido principalmente à dificuldade de sua quantificação (HOLMES e REED, 1991; OHEIMB et al., 2011).

Muitos estudos sobre quantificação da competição entre as árvores foram conduzidos em florestas de uma ou poucas espécies (GLOVER e HOOL, 1979; MARTIN e EK, 1984; BIGING e DOBBERTIN, 1992, 1995; PRETZSCH, 2002; MARTINS et al., 2011; CASTRO, 2011), sendo escassos os estudos em áreas com elevada riqueza de espécies (HAMILTON, 1986; ZHAO et al., 2006; OHEIMB et al., 2011).

Na literatura são conhecidos os índices de competição dependentes da distância (IDD), independentes da distância (IID) e semi-independente da distância (ISD) (ALIG et al., 1984; STAGE e LEDERMANN, 2008; CONTERAS et al., 2011). Os índices de competição diferem conceitualmente em função do critério utilizado para expressar as relações entre as árvores.

Nos índices de competição dependentes da distância são atribuídas coordenadas espaciais para cada árvore, as quais permitem ponderar a competição entre cada árvore e as circunvizinhas pela distância, sendo mais complexos e exigentes em termos de coleta de dados (HYNYNEN, 1995). Uma grande variedade destes índices foi introduzida em estudos de crescimento e produção de árvores em florestas homogêneas na América do Norte (BIGING e DOBBERTIN, 1992) e Europa (TOMÉ e BURKHART, 1989).

Os índices independentes da distância não utilizam informações da distribuição espacial dos indivíduos, sendo quantificados pela razão entre diâmetro e/ou altura das árvores e variáveis do povoamento, tais como área basal, diâmetro médio e altura média (DANIELS et al., 1986; PRODAN et al., 1997; DELLAFLORA, 2001). Os vizinhos (árvores competidoras) da árvore-objeto (aquela em estudo) são definidos pelas árvores incluídas na mesma unidade amostral (SIRONEN et al., 2002).

Já para o cálculo dos índices de competição semi-independentes da distância, são aplicados os índices independentes da distância, entretanto, espacialmente restritos a um menor conjunto de árvores vizinhas (aquelas mais próximas), ao invés de todas as árvores da unidade amostral (STAGE e LEDERMANN, 2008; LEDERMAN, 2010; CONTRERAS et al., 2011).

A eficiência da modelagem do crescimento e da mortalidade em nível de árvore individual pode ser maior com o uso de índices de competição (LORIMER, 1983; CASTRO, 2011). Martin e Ek (1984), ao incluírem índices de competição independentes da distância nos modelos de crescimento de *Pinus resinosa*, obtiveram resultados superiores em relação aos modelos sem a utilização de índices. Pukkala e Kolstrem (1987) avaliaram vários índices dependentes da distância e verificaram que os melhores índices poderiam explicar até 50% da variação de crescimento em diâmetro para *Pinus sylvestris*. Biging e Dobbertin (1995), ao revisarem vários estudos em relação aos ganhos no poder de predição com a utilização de índices de competição, concluíram que a superioridade de um índice é verificada somente para determinadas situações e espécies.

Na avaliação do desempenho dos índices de competição é frequente a estimação da correlação com as variáveis de interesse, como o crescimento em diâmetro, a área basal e a altura (DANIELS et al., 1986; WEBER et al., 2008) e a

probabilidade de mortalidade (MARTINS et al., 2011). Em florestas naturais tropicais ainda são escassos trabalhos avaliando índices de competição e a sua relação com o crescimento das árvores.

O presente estudo teve como objetivo estimar e avaliar índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes da distância em árvores individuais de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, e identificar aqueles índices que mais se correlacionam com o crescimento diamétrico, crescimento em altura e probabilidade de mortalidade de árvores.

2. MATERIAL E MÉTODOS

1.1. Dados

Este estudo foi realizado no município de Viçosa, Minas Gerais, em um fragmento florestal pertencente à Universidade Federal de Viçosa, que possui 17 ha de área (42°52'W e 42° 50'W de longitude e 20° 44'S e 20° 47'S de latitude).

O clima local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, temperado quente, com média das temperaturas máximas de 26°C e média das temperaturas mínima de 14°C, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos (AMARO, 2010).

A precipitação média anual durante o período desse estudo foi de 1.280 mm (INMET, 2012). O solo apresenta a predominância de duas classes: no topo e nas encostas das elevações ocorrem os latossolos vermelho-amarelo álico, enquanto nos terraços o solo predominante é o Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico (REZENDE, 1971). A topografia da região é acidentada, com vales estreitos e úmidos e altitude variando de 600 a 970 metros (CORRÊA, 1984).

O município de Viçosa pertence à região fitoecológica de Floresta Estacional Semidecidual Montana (VELOSO et al., 1991) e o fragmento estudado encontra-se em estágio médio de sucessão (FIGUEIREDO, 2011).

Para o presente trabalho, foi amostrada uma área de um hectare, constituída por dez parcelas retangulares, não contínuas, de 1.000 m² cada (20m x 50m), distribuídas aleatoriamente no fragmento (MEIRA NETO e MARTINS, 2000).

Em cada parcela, as árvores foram identificadas e mensurados os diâmetros a 1,3 m de altura (*dap*) e altura total (*Ht*) de todas as árvores com *dap* ≥ 5 cm, nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008. Para cada árvore foram determinadas as coordenadas x e y em relação à origem da sua parcela e criado um mapa de

localização dos indivíduos com auxílio do *software* ArcGis 10. Para o cálculo das distâncias entre cada árvore e as suas competidoras, foi utilizada a ferramenta *Point Distance* disponível no *software* ArcGis 10.

A identificação de todo o material botânico coletado foi feita por meio de comparações com o material do Herbário do Departamento de Biologia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa (VIC-UFV) e consultas a especialistas. O sistema de classificação adotado foi o APG III (2009). Os indivíduos foram classificados em grupos ecológicos segundo Gandolfi et al. (1995).

As principais características quantitativas do povoamento estudado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos dados levantados no fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizado em Viçosa - Minas Gerais

Variável	Ano de medição				
	1994	1997	2000	2004	2008
<i>dap</i> mínimo (cm)	5,1	5,1	5,1	5,1	5,0
<i>dap</i> médio (cm)	11,6	11,8	12,0	12,0	12,2
<i>dap</i> máximo (cm)	80,2	82,1	84,0	85,6	91,0
<i>q</i> (cm)	14,2	14,6	14,9	15,0	15,3
<i>Ht</i> mínima (m)	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4
<i>Ht</i> média (m)	10,4	11,1	11,4	12,4	12,5
<i>Ht</i> máxima (m)	32,1	32,4	33,0	39,2	39,4
Área basal (m ² ha ⁻¹)	24,1	25,9	26,2	26,2	27,5
Volume (m ³ ha ⁻¹)	235,5	275,2	291,4	323,9	342,1
Famílias botânicas	43	43	43	42	42
Gêneros botânicos	100	98	99	99	103
Espécies identificadas	136	135	137	135	148
Espécies não identificadas	4	3	4	3	5
Número de fustes (ha)	1521	1540	1497	1474	1492
Densidade (árvores ha ⁻¹)	1379	1383	1331	1307	1326
Índice de Shannon-Weaver (H')	4,07	4,02	4,00	3,96	4,02
Número de indivíduos ingressos (ha)*	-	114	79	57	134
Número de indivíduos mortos (ha)*	-	95	122	80	115

* Refere-se ao número de indivíduos ingressos / mortos desde a medição imediatamente anterior.

2.1. Índices de competição

Para cada fuste, em cada medição, foram estimados índices de competição independentes da distância (IID), dependentes da distância (IDD) e semi-independentes da distância (ISD). Para automatizar o cálculo dos índices foi

desenvolvido um aplicativo para cada categoria de índice em ambiente *Visual Basic for Applications*, utilizando o Microsoft Excel®, versão 2007.

Para os índices independentes e semi-independentes da distância, foram utilizados dois raios de vizinhança, de seis e três metros, ao quais correspondem, em média, a 16 vizinhos para o raio competitivo de seis metros, e 3,3 vizinhos no raio de três metros, conforme apresentado na Figura 1. Os vizinhos só foram qualificados como competidores se tivessem o nível de inclusão mínimo de $dap \geq 5\text{cm}$.

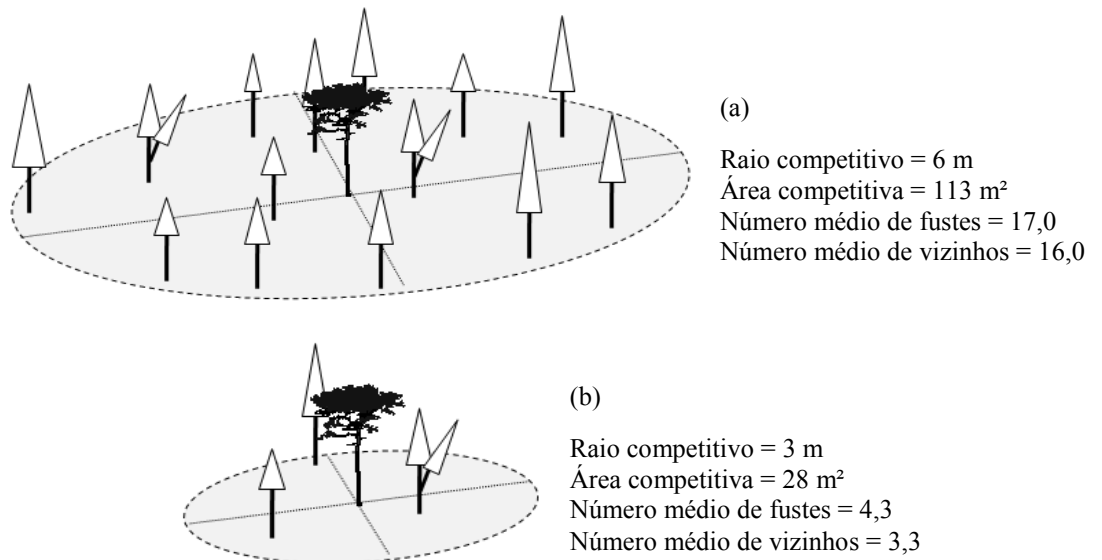


Figura 1 – Raios competitivos utilizados para cálculo dos índices dependentes e semi-independentes da distância. Em que (T) representa a árvore-objeto e (T e T) representam os indivíduos vizinhos.

Não foram avaliados raios de competição maiores devido à limitação de tamanho das unidades amostrais (parcelas), conforme já reportado por Biging e Dobbertin (1995). Em raios maiores, as árvores próximas à bordadura das parcelas seriam sensivelmente influenciadas no cálculo dos índices, visto que menos competidores são observados, o que resulta em uma subestimação da competição.

Hegyí (1974) determinou o número de competidores utilizando um raio de 3,05 m a partir da árvore-objeto e Béland et al. (2003), variou o raio de competição entre 3 e 9 m, e indicou o raio competitivo de 6 m após a simulação em modelos de regressão, ambos em povoamentos de *Pinus*.

A relação funcional de cada índice de competição utilizado é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação funcional dos índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes da distância

Índices independentes da distância	Autor (es)	Equação
$IID1 = \frac{dap_i^2}{\bar{d}^2}$	Glover e Hool (1979)	(1)
$IID2 = \frac{Ht_i}{\bar{Ht}}$	Glover e Hool (1979)	(2)
$IID3 = \frac{dap_i^2 Ht_i}{\bar{d}^2 \bar{Ht}}$	Glover e Hool (1979)	(3)
$IID4 = \frac{AS_i^2}{ASq^2}$	Stage (1973)	(4)
$IID5 = BAL_i$	Stage (1973)	(5)
Índices dependentes da distância		
$IDD1 = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} dap_i}{\sum_{j=1}^{n_j} dap_j \cdot L_{ij}}$	Hegy (1974)	(6)
$IDD2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_j} Ht_i}{\sum_{j=1}^{n_j} Ht_j \cdot L_{ij}}$	Este trabalho	(7)
Índices semi-independentes da distância		
$ISD1 = \frac{dap_i^2}{\bar{d}_n^2}$	Adaptado de Glover e Hool (1979)	(8)
$ISD2 = \frac{Ht_i}{\bar{Ht}_n}$	Adaptado de Glover e Hool (1979)	(9)
$ISD3 = \frac{dap_i^2 Ht_i}{\bar{d}_n^2 \bar{Ht}_n}$	Adaptado de Glover e Hool (1979)	(10)
$ISD4 = \frac{AS_i^2}{ASq_n^2}$	Adaptado de Stage (1973)	(11)

em que: dap_i = diâmetro com casca do fuste da árvore-objeto, medido a 1,30 m (cm); \bar{d} = média aritmética dos diâmetros dos fustes da unidade amostral (cm); Ht_i = altura total do fuste da árvore-objeto (m); \bar{Ht} = altura média dos fustes da unidade amostral (m); AS_i = área seccional do fuste da árvore-objeto, medido a 1,30 m de altura (m²), ASq = área seccional correspondente ao diâmetro médio (q) dos fustes das árvores vizinhas (m²); BAL_i = somatório das áreas seccionais dos fustes das árvores vizinhas maiores que o fuste da árvore-objeto; dap_j = diâmetro com casca do fuste da árvore competidora, medido a 1,30 m de altura (cm); Ht_j = altura total do fuste da árvore competidora (m); L_{ij} = distância entre a árvore-objeto e a árvore competidora (cm); n_j = número de fustes competidores limitados a um raio de competição de 6 ou 3 m; \bar{d}_n = média aritmética dos diâmetros dos fustes de n árvores próximas da árvore-objeto (cm), limitadas a um raio de competição de 6 ou 3 m; \bar{Ht}_n = altura média dos fustes de n árvores próximas da árvore-objeto (m), limitadas a um raio de competição de 6 ou 3 m; ASq_n = área seccional (m²) correspondente ao diâmetro médio (q) dos fustes das árvores vizinhas, limitadas a um raio de competição de 6 ou 3 m.

2.2. Avaliação dos índices de competição

Depois de calculados os índices de competição, foram realizadas análises gráficas relacionando o crescimento anual em diâmetro e em altura com cada índice

estudado. Em seguida foi elaborada uma matriz de correlação linear entre os índices e o crescimento anual em diâmetro (Δdap), crescimento anual em altura (ΔHt), e à probabilidade de mortalidade (Pm), obtidos entre cada intervalo de medição. A significância das correlações foram avaliadas ao nível de 95% de probabilidade.

Foram estimadas correlações considerando todas as espécies em conjunto e também para 36 espécies, selecionadas por apresentarem densidade maior ou igual a 10 indivíduos.

A probabilidade de mortalidade (Pm) foi obtida calculando-se a proporção de fustes mortos por classe de diâmetro para cada parcela, entre os intervalos de medição, por meio da seguinte expressão (adaptado de MARTINS et al., 2011; CASTRO, 2011):

$$Pm = \frac{(n_{j1} - n_{j2}) - I_{j1j2}}{\sum_{i=1}^j n_{j1}} \cdot 100 \quad (12)$$

em que n_{j1} é o número de fustes vivos na j -ésima classe de diâmetro, no início do período, n_{j2} é o número de fustes vivos na j -ésima classe de diâmetro no fim do período, descontados os indivíduos ingressos entre os períodos seguintes (I_{j1j2}).

Utilizando as correlações estimadas para cada uma das 36 espécies, foi calculado um valor de superioridade (VS) para cada índice de competição, em relação a cada variável estudada (Δdap , ΔHt e Pm). O valor de superioridade para cada índice i foi calculado pelo somatório do valor de importância das espécies que apresentaram esse índice i com o maior coeficiente de correlação significativa (em módulo), de acordo com a seguinte fórmula, desenvolvida para este estudo:

$$VS_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^n IVI \right) w_j}{y} \quad (13)$$

em que VS_{ij} é valor de superioridade do índice i , relativo à categoria de índices j (IID , IDD ou ISD); IVI é o índice de valor de importância da espécie k , caso a correlação seja significativa; w é o número de índices existentes na categoria j ; y é o número total de índices, considerando todas as categorias¹.

Dentro de cada categoria de índices e cada variável, aquele índice de competição que apresentou maior valor de superioridade (VS) foi considerado como sendo o mais indicado para ser utilizado em modelos para todas as espécies em conjunto. O termo w da equação 13 foi utilizado como ponderação entre índices de diferentes categorias (que apresentam diferentes quantidades de índices). Assim foi possível a comparação da superioridade entre índices de diferentes categorias.

¹ o valor de w utilizado no cálculo do VS de cada índice foi igual a 5, 4 e 8, respectivamente para as categorias dos índices IID , IDD e ISD e o valor de y foi igual a 17.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tendências médias dos índices de competição apresentaram coerência em relação ao crescimento em diâmetro e em altura das árvores (Figura 2).

Para os índices IID1 a IID4 e de ISD1 a ISD4 (eq. 1 a 4 e 8 a 11) foi observado que quanto menor o crescimento em diâmetro e altura, menor o índice de competição. Estes índices são derivados da razão entre uma variável dendrométrica ou uma combinação de variáveis dendrométricas do fuste da árvore-objeto em relação à média das mesmas variáveis dos fustes das árvores qualificadas como vizinhas. Isto indica que, de forma geral, fustes que apresentam sua variável dendrométrica inferior à média dos fustes vizinhos apresentarão menores índices, resultando em menor crescimento. Essa mesma tendência foi observada por outros autores como Tomé e Burkhart (1989) e Martins et al. (2011).

O índice IID5 apresenta menores valores para os fustes com maior crescimento em diâmetro e altura, contrariamente ao que ocorre com os índices anteriores. Tal fato foi explicado por Martins et al. (2011), pois consiste no somatório das áreas seccionais dos fustes maiores que o fuste da árvore-objeto, de forma que os menores fustes apresentam maiores valores no referido índice. Quanto maior o IID5, maior o nível de competição.

Os índices dependentes da distância (eq. 6 e 7), com os raios competitivos de 6 e 3 m, também apresentaram tendência de aumento à medida em que são observados maiores valores de crescimento, por também serem quantificados a partir de uma razão entre variáveis dendrométricas. Entretanto, como são ponderados pela distância entre as vizinhas e a árvore-objeto, o comportamento dos índices para fustes de mesmo tamanho pode ser variado, devido à distribuição das árvores presentes nas parcelas.

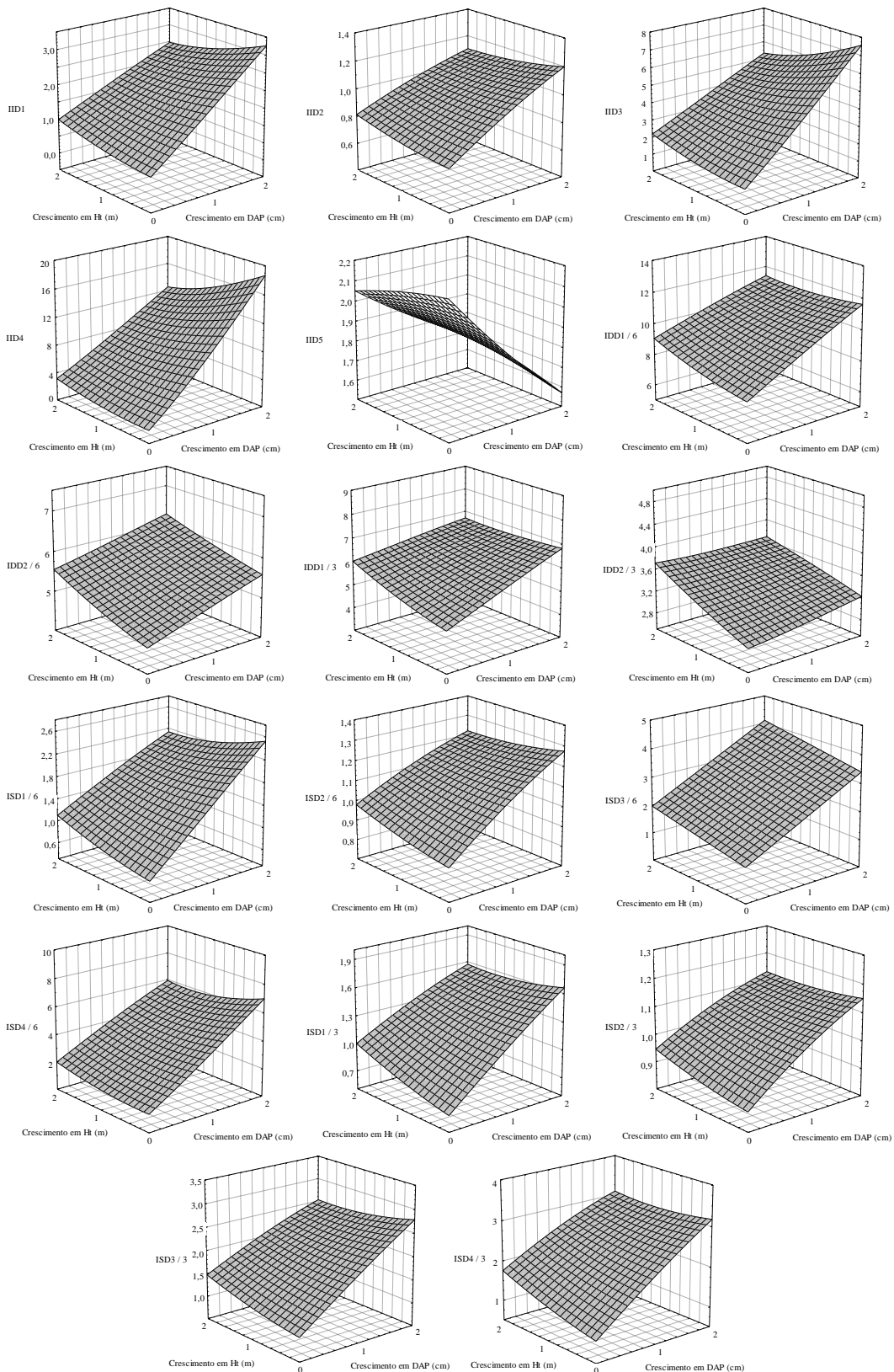


Figura 2 – Índices de competição em função do crescimento periódico anual em diâmetro e em altura dos fustes de árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais.

*/(6) representa um raio competitivo de 6 m e (/3) um raio de três m.

Apesar da coerência apresentada pelos índices de competição (Figura 2), quando realizadas as análises de correlações lineares com o crescimento em diâmetro, o crescimento em altura e a probabilidade de mortalidade para todas as espécies em conjunto, foram observadas correlações inferiores a 30%, entretanto, em sua maioria, significativas a 95% de probabilidade (Tabela 3).

Tabela 3 – Correlações lineares entre índices de competição independentes (IID), dependentes (IDD) e semi-independentes da distância (ISD) e as variáveis de diâmetro à 1,3 m de altura (*dap*), altura total (*Ht*), crescimento em diâmetro (Δdap), crescimento em altura (ΔHt) e probabilidade de mortalidade (*Pm*) em árvores individuais de uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais

Índice	Área de competição	<i>dap</i>	<i>Ht</i>	Δdap	ΔHt	<i>Pm</i>
IID1	toda a área da parcela	0,91*	0,67*	0,26*	0,14*	-0,26*
IID2	toda a área da parcela	0,83*	0,96*	0,28*	0,18*	-0,25*
IID3	toda a área da parcela	0,83*	0,60*	0,24*	0,11*	-0,23*
IID4	toda a área da parcela	0,62*	0,37*	0,17*	0,07 ^{n.s.}	-0,16*
IID5	toda a área da parcela	-0,57*	-0,51*	-0,20*	-0,12*	0,21*
IDD1 / 6	6 m de raio em relação à árvore-objeto	0,40*	0,32*	0,12*	0,12*	-0,13*
IDD2 / 6	6 m de raio em relação à árvore-objeto	0,21*	0,24*	0,07 ^{n.s.}	0,12*	-0,07 ^{n.s.}
IDD1 / 3	3 m de raio em relação à árvore-objeto	0,27*	0,21*	0,09 ^{n.s.}	0,10 ^{n.s.}	-0,09 ^{n.s.}
IDD2 / 3	3 m de raio em relação à árvore-objeto	0,14*	0,15*	0,04 ^{n.s.}	0,10 ^{n.s.}	-0,05 ^{n.s.}
ISD1 / 6	6 m de raio em relação à árvore-objeto	0,84*	0,63*	0,21*	0,16*	-0,26*
ISD2 / 6	6 m de raio em relação à árvore-objeto	0,70*	0,78*	0,20*	0,16*	-0,21*
ISD3 / 6	6 m de raio em relação à árvore-objeto	0,78*	0,58*	0,20*	0,12*	-0,23*
ISD4 / 6	6 m de raio em relação à árvore-objeto	0,63*	0,42*	0,15*	0,11*	-0,19*
ISD1 / 3	3 m de raio em relação à árvore-objeto	0,77*	0,62*	0,19*	0,17*	-0,24*
ISD2 / 3	3 m de raio em relação à árvore-objeto	0,56*	0,62*	0,15*	0,12*	-0,17*
ISD3 / 3	3 m de raio em relação à árvore-objeto	0,74*	0,61*	0,20*	0,14*	-0,23*
ISD4 / 3	3 m de raio em relação à árvore-objeto	0,62*	0,48*	0,18*	0,14*	-0,20*

*indicam correlações significativas e n.s. indicam correlações não significativas, a 95 % de probabilidade.

As baixas correlações são atribuídas à elevada heterogeneidade de espécies na floresta, idades das árvores e condições gerais de crescimento e sanidade, dentre outros.

Os índices de competição são calculados em função dos tamanhos dos fustes das árvores e, para alguns deles, utilizando a informação de distância. Dessa forma, em fustes de mesmo porte são atribuídos índices de competição com valores muito próximos, mesmo que não possuam mesmas taxas de crescimento.

Em florestas tropicais, existem grandes variações no crescimento (diâmetro e altura) em indivíduos de mesmo tamanho. Enquanto algumas espécies crescem muito

em um período, outras não crescem. Além disso, neste estudo não foram avaliados atributos de tamanho das copas das árvores para quantificação dos índices, os quais poderiam colaborar com o entendimento das variáveis, como reportado por Canham et al. (2004) e Coates et al. (2009).

Contrariamente, em florestas equiâneas, árvores de mesmo tamanho possuem taxas de crescimento semelhantes. Assim, podem ser observados valores de correlações superiores, conforme apresentado por Martins et al. (2011).

Os índices apresentaram sinais coerentes de correlação com a probabilidade de mortalidade (Tabela 3). Com o aumento da probabilidade de mortalidade houve tendência de aumento do índice IID5 (correlação positiva) e tendência de diminuição dos demais índices (correlações negativas). Isso indica que, em média, árvores menores possuem maiores probabilidades de morrer. Rossi et al., (2007) também afirma que, em florestas inequiâneas, é esperado uma maior probabilidade de mortalidade em árvores das classes de diâmetro inferiores, visto que representam as árvores suprimidas da floresta.

Ainda não foram desenvolvidos índices de competição que relacionam conceitos de competição intra-específica (entre indivíduos da mesma espécie) e interespecífica (entre indivíduos de espécies diferentes), que poderia aumentar sobremaneira o entendimento da competição entre árvores em florestas inequiâneas.

As correlações lineares entre os índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes da distância e as variáveis Δdap , ΔHt e Pm por espécie, para aquelas que apresentaram densidade maior ou igual a 10 indivíduos, são apresentadas na Tabela 4, sendo apresentado apenas aquele índice (dentre os 17 índices¹), com a maior correlação (em módulo) de cada categoria e para cada espécie.

¹considerando os diferentes raios de vizinhança: 5 índices IID; 4 índices IDD (sendo dois com raio de 6 m e dois com raio de 3 m; e oito índices ISD (sendo quatro com raio de 6 m e dois com raio de 3 m).

Tabela 4 – Maiores correlações entre os índices de competição (IID, IDD e ISD) e o crescimento em diâmetro (Δdap), crescimento em altura (ΔHt) e probabilidade de mortalidade (Pm) para diferentes espécies. Foram realizadas apenas para as espécies com densidade ≥ 10 indivíduos

Espécie	GE	n	IVI	Δdap					ΔHt					Pm							
				IID	r_{yy}	IDD	r_{yy}	ISD	r_{yy}	IID	r_{yy}	IDD	r_{yy}	ISD	r_{yy}	IID	r_{yy}	IDD	r_{yy}	ISD	r_{yy}
<i>Albizia polycephala</i>	SI	15	1,13	IID2	0,26	IDD2/3	0,14	ISD2/6	<u>0,29</u>	IID5	-0,15	IDD2/3	0,06	ISD4/6	<u>0,35</u>	IID3	-0,19	IDD2/6	-0,27	ISD1/6	-0,39
<i>Allophylus edulis</i>	SI	14	1,10	IID2	0,11	IDD2/3	-0,42	ISD4/3	0,19	IID4	0,08	IDD2/3	-0,15	ISD2/3	-0,17	IID1	-0,34	IDD1/6	-0,14	ISD1/3	-0,41
<i>Anadenanthera peregrina</i>	SI	66	8,09	IID5	-0,27	IDD1/6	0,11	ISD2/6	<u>0,21</u>	IID1	0,08	IDD1/6	0,09	ISD4/6	<u>0,19</u>	IID2	-0,34	IDD1/6	-0,20	ISD1/6	-0,34
<i>Aparisthium cordatum</i>	PI	83	2,92	IID2	0,12	IDD2/3	-0,08	ISD2/6	<u>0,22</u>	IID2	-0,13	IDD2/6	0,09	ISD1/3	0,07	IID4	-0,42	IDD2/3	0,03	ISD1/6	-0,40
<i>Apuleia leiocarpa</i>	SI	49	3,26	IID2	<u>0,44</u>	IDD1/6	<u>0,22</u>	ISD2/6	<u>0,46</u>	IID5	-0,08	IDD2/6	0,04	ISD1/6	0,08	IID2	-0,45	IDD1/6	-0,13	ISD2/6	-0,40
<i>Bathysa nicholsonii</i>	SI	172	5,64	IID2	<u>0,17</u>	IDD2/6	0,00	ISD4/6	-0,07	IID3	<u>0,15</u>	IDD1/6	-0,08	ISD3/3	0,10	IID3	-0,16	IDD2/3	-0,07	ISD3/6	-0,14
<i>Carpotroche brasiliensis</i>	ST	14	0,68	IID5	-0,17	IDD1/6	0,26	ISD2/6	0,20	IID2	-0,15	IDD1/6	-0,04	ISD4/6	-0,17	IID2	-0,15	IDD2/3	-0,20	ISD2/3	-0,14
<i>Casearia arborea</i>	SI	24	1,58	IID2	0,07	IDD2/6	0,18	ISD2/6	0,14	IID5	0,17	IDD1/3	-0,23	ISD2/3	-0,32	IID5	<u>0,35</u>	IDD1/6	-0,09	ISD3/6	-0,26
<i>Casearia ulmifolia</i>	SI	73	4,04	IID2	<u>0,22</u>	IDD2/3	-0,03	ISD2/6	<u>0,27</u>	IID1	0,11	IDD2/6	0,08	ISD2/3	-0,08	IID5	<u>0,28</u>	IDD1/6	-0,18	ISD1/6	-0,21
<i>Copaifera langsdorffii</i>	ST	11	0,86	IID2	<u>0,32</u>	IDD2/6	<u>0,44</u>	ISD2/6	<u>0,45</u>	IID5	-0,15	IDD2/6	<u>0,32</u>	ISD2/6	0,22	IID2	-0,46	IDD1/6	-0,42	ISD1/6	-0,41
<i>Dalbergia nigra</i>	SI	12	1,14	IID3	0,17	IDD1/6	0,14	ISD2/3	0,18	IID4	0,24	IDD2/6	<u>0,54</u>	ISD1/3	<u>0,54</u>	IID1	-0,26	IDD1/6	-0,15	ISD1/6	-0,20
<i>Endlicheria paniculata</i>	ST	11	0,69	IID4	-0,34	IDD2/6	-0,40	ISD2/6	-0,55	IID2	-0,42	IDD1/3	0,22	ISD2/6	-0,24	IID5	0,18	IDD2/6	-0,15	ISD2/3	0,36
<i>Heisteria silviani</i>	SI	11	0,73	IID2	0,10	IDD2/6	0,27	ISD2/6	0,15	IID4	-0,09	IDD2/6	0,10	ISD3/3	-0,16	IID4	-0,36	IDD1/6	-0,11	ISD3/3	-0,37
<i>Jacaranda macrantha</i>	SI	44	1,88	IID3	0,07	IDD2/3	-0,08	ISD1/3	0,13	IID1	<u>0,21</u>	IDD1/6	0,13	ISD4/6	<u>0,27</u>	IID5	-0,26	IDD2/6	-0,07	ISD3/3	-0,11
<i>Lacistema pubescens</i>	SI	32	1,76	IID2	-0,16	IDD2/3	0,11	ISD2/6	-0,15	IID1	0,13	IDD2/3	<u>0,20</u>	ISD2/6	<u>0,22</u>	IID1	-0,34	IDD1/3	-0,15	ISD3/3	-0,40
<i>Luehea speciosa</i>	ST	14	1,21	IID4	-0,07	IDD2/3	-0,14	ISD2/6	-0,12	IID4	<u>0,52</u>	IDD1/6	<u>0,36</u>	ISD1/6	<u>0,51</u>	IID2	-0,29	IDD2/3	0,06	ISD2/3	-0,27
<i>Mabea fistulifera</i>	PI	24	1,34	IID5	0,18	IDD2/6	-0,06	ISD2/6	-0,25	IID4	0,17	IDD2/6	<u>0,51</u>	ISD1/3	<u>0,23</u>	IID5	-0,29	IDD2/6	0,15	ISD4/3	0,24
<i>Machaerium floridum</i>	SI	22	1,62	IID5	<u>0,27</u>	IDD2/6	0,14	ISD4/6	-0,12	IID4	<u>0,29</u>	IDD2/3	-0,03	ISD1/3	<u>0,33</u>	IID5	0,21	IDD1/3	-0,23	ISD3/3	-0,29
<i>Matayba elaeagnoides</i>	SI	12	1,00	IID1	-0,09	IDD2/3	-0,11	ISD1/3	-0,10	IID5	-0,29	IDD1/6	0,13	ISD1/6	0,20	IID2	-0,24	IDD1/6	-0,24	ISD4/6	-0,27
<i>Maytenus robusta</i>	ST	10	0,69	IID2	0,28	IDD1/3	-0,03	ISD2/6	0,25	IID4	0,29	IDD2/3	-0,25	ISD4/3	<u>0,42</u>	IID4	0,48	IDD1/6	0,17	ISD1/3	0,47
<i>Myrcia formosiana</i>	ST	37	1,89	IID2	<u>0,29</u>	IDD2/6	<u>0,22</u>	ISD2/6	<u>0,30</u>	IID2	0,05	IDD2/3	0,10	ISD2/6	0,08	IID1	-0,35	IDD1/6	-0,16	ISD2/6	-0,35
<i>Newtonia contorta</i>	ST	41	3,53	IID2	<u>0,54</u>	IDD1/6	<u>0,31</u>	ISD1/3	<u>0,51</u>	IID2	<u>0,19</u>	IDD2/6	<u>0,30</u>	ISD2/6	<u>0,18</u>	IID2	-0,46	IDD1/6	-0,30	ISD1/6	-0,42
<i>Ocotea dispersa</i>	ST	15	1,01	IID2	<u>0,36</u>	IDD2/6	<u>0,26</u>	ISD2/6	<u>0,36</u>	IID1	0,17	IDD1/6	0,21	ISD1/6	0,18	IID5	0,24	IDD2/6	-0,12	ISD4/3	-0,17
<i>Ocotea odorifera</i>	ST	25	1,57	IID2	<u>0,53</u>	IDD1/6	<u>0,23</u>	ISD1/6	<u>0,48</u>	IID1	<u>0,30</u>	IDD1/6	0,17	ISD4/6	<u>0,32</u>	IID5	<u>0,42</u>	IDD1/6	-0,40	ISD3/3	-0,41
<i>Ocotea pubescens</i>	ST	10	0,56	IID5	-0,44	IDD2/3	0,03	ISD1/6	-0,07	IID1	0,27	IDD2/6	0,25	ISD1/3	<u>0,33</u>	IID5	<u>0,34</u>	IDD1/3	0,09	ISD4/3	-0,23
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	SI	29	1,75	IID2	<u>0,48</u>	IDD1/6	<u>0,28</u>	ISD2/6	<u>0,36</u>	IID5	-0,17	IDD1/6	<u>0,29</u>	ISD2/3	<u>0,26</u>	IID5	<u>0,55</u>	IDD1/6	-0,32	ISD1/6	-0,37
<i>Platypodium elegans</i>	ST	19	1,77	IID4	<u>0,56</u>	IDD2/3	-0,15	ISD4/6	<u>0,56</u>	IID2	0,06	IDD2/6	0,15	ISD4/3	0,15	IID3	-0,40	IDD1/6	-0,17	ISD4/6	-0,45
<i>Prunus sellowii</i>	SI	20	1,14	IID5	-0,12	IDD2/6	-0,10	ISD3/6	0,09	IID4	<u>0,41</u>	IDD2/3	-0,02	ISD3/6	<u>0,32</u>	IID5	<u>0,55</u>	IDD1/6	-0,18	ISD1/6	-0,49
<i>Rheedia gardneriana</i>	ST	10	0,51	IID4	<u>0,38</u>	IDD1/6	<u>0,33</u>	ISD3/6	<u>0,44</u>	IID2	<u>0,32</u>	IDD2/3	<u>0,48</u>	ISD2/6	0,20	IID2	-0,38	IDD1/3	-0,25	ISD4/6	-0,22
<i>Rollinia laurifolia</i>	SI	11	1,00	IID4	-0,16	IDD1/3	-0,29	ISD4/3	-0,19	IID5	-0,06	IDD2/3	0,16	ISD3/6	-0,21	IID5	<u>0,38</u>	IDD2/6	0,11	ISD4/6	-0,41
<i>Rollinia sylvatica</i>	SI	37	2,11	IID5	-0,08	IDD2/3	0,03	ISD3/3	-0,11	IID5	-0,18	IDD2/3	0,05	ISD3/3	0,16	IID4	-0,13	IDD1/6	-0,03	ISD4/6	-0,11
<i>Siparuna arianaeae</i>	SI	133	4,25	IID5	-0,12	IDD2/3	-0,02	ISD2/6	0,06	IID3	-0,07	IDD2/6	0,08	ISD3/3	-0,08	IID2	-0,18	IDD2/3	0,04	ISD3/6	-0,17
<i>Sorocea bomplandii</i>	SI	12	0,88	IID2	<u>0,31</u>	IDD1/6	0,14	ISD4/6	<u>0,34</u>	IID2	0,17	IDD1/3	-0,22	ISD2/3	-0,11	IID4	-0,23	IDD1/6	0,32	ISD2/6	0,33
<i>Tapirira guianensis</i>	SI	11	0,84	IID4	<u>0,47</u>	IDD2/3	0,26	ISD4/3	<u>0,58</u>	IID1	0,08	IDD2/3	-0,08	ISD4/6	0,18	IID5	0,23	IDD1/6	-0,12	ISD4/3	0,16
<i>Tovomitopsis saldanhae</i>	SI	16	0,99	IID5	-0,09	IDD2/6	0,11	ISD2/3	0,22	IID4	0,08	IDD2/3	0,11	ISD2/3	-0,24	IID3	-0,43	IDD1/6	-0,20	ISD3/6	-0,39
<i>Trichilia lepidota</i>	ST	11	0,82	IID5	-0,23	IDD2/3	-0,14	ISD2/6	0,07	IID4	<u>0,42</u>	IDD2/6	0,10	ISD4/6	<u>0,39</u>	IID5	0,24	IDD1/6	-0,11	ISD3/3	-0,10
Total		1.150	66,0																		

Correlações sublinhadas são significativas a 95 % de probabilidade; em negrito, apresentaram comportamentos contrários à tendência média da floresta; (/6) e (/3) representam raios competitivos de 6 e 3 m, respectivamente; PI são espécies pertencentes ao grupo ecológico (GE) das pioneiras; SI, secundárias iniciais e ST, secundárias tardias; IVI é o índice de valor de importância de cada espécie.

As correlações significativas para o crescimento em diâmetro variaram entre -0,12 e -0,55, e 0,17 e 0,58. As maiores correlações positivas foram observadas para as espécies *Tapirira guianensis* (ISD4/3), *Platypodium elegans* (IID4) e *Newtonia contorta* (IID2), com correlações variando entre 0,54 e 0,58. As maiores correlações negativas, em módulo, foram observadas para as espécies *Endlicheria paniculata* (ISD2/6) e *Allophylus edulis* (IDD2/3), com correlações de -0,42 e -0,55.

Para o crescimento em altura, foram constatadas correlações significativas variando entre -0,18 e -0,42, e 0,15 e 0,54. Maiores correlações positivas foram verificadas para as espécies *Dalbergia nigra* (IDD2/6), *Luehea speciosa* (IID4) e *Mabea fistulifera* (IDD2/6), variando entre 0,51 a 0,54, e as correlações negativas para as espécies *Endlicheria paniculata* (IID2) e *Casearia arborea* (ISD2/3), iguais a -0,32 e -0,42, respectivamente.

Ganhos consideráveis nos valores de correlações, quando calculadas em nível de espécie, foram observados para a variável probabilidade de mortalidade. As correlações significativas variaram entre -0,16 e -0,49, e 0,24 e 0,55. As maiores correlações positivas foram observadas para as espécies *Piptadenia gonoacantha* (IID5), *Prunus sellowii* (IID5) e *Maytenus robusta* (IID4), variando entre 0,48 e 0,55. As maiores correlações negativas, em módulo, foram observadas para as espécies *Prunus sellowii* (ISD1/6), *Copaifera langsdorffii* (IID2) e *Newtonia contorta* (IID2), variando entre -0,46 a -0,49.

Estes valores de correlações significativas, em nível de espécie, estão em consonância com valores descritos na literatura. González et al. (2006) ao estudarem a correlação entre o crescimento em diâmetro de *Quercus suber*, observaram correlação de -0,34 com o IID5. Para *Pinus taeda*, foram encontradas correlações entre 0,23 e 0,31 entre o crescimento em diâmetro e índices independentes da distância (DANIELS et al., 1986). Martins et al. (2011) constatou correlações para crescimento em diâmetro e índices independentes da distância variando entre -0,74 a 0,52 para um híbrido de *Eucalyptus*.

Cunha (2009), utilizando índices independentes e dependentes da distância, observou correlações entre -0,57 e 0,59 para os melhores índices de competição em relação ao crescimento em área basal da espécie *Cedrela odorata*, na Floresta Amazônica.

Para o crescimento em altura, Martin e Ek (1984) encontraram valores de correlações inferiores a 0,39 para índices independentes da distância e inferiores a 0,30 para índices dependentes da distância para *Pinus resinosa*. Martins et al. (2011) encontrou correlações entre índices independentes da distância e crescimento em altura variando entre 0,52 e -0,69 para um híbrido de *Eucalyptus*. Chassot et al. (2011) observou valores inferiores a -0,64 para correlações entre índices independentes da distância e crescimento em altura em *Araucaria angustifolia*.

Em relação à mortalidade, Martins et al. (2011) estimou correlações entre índices independentes da distância e a probabilidade de mortalidade entre -0,28 a 0,62, para um híbrido de *Eucalyptus*.

De maneira geral, árvores maiores, por estarem no estrato superior das florestas, têm menor competição (CUNHA, 2009). Assim, por possuírem melhores condições de iluminação, apresentam maiores taxas de crescimento (KING e MAINDONALD, 1999; LIEBERMAN e PUTZ, 1987, COSTA et al.; 2008). Consequentemente, árvores de porte pequeno, localizadas no sub-bosque, têm maior competição e apresentam menores taxas de crescimento (CARVALHO, 1992) e maiores probabilidades de mortalidade (MARTINS et al., 2011). Isso foi observado quando se avaliou o comportamento médio de crescimento em diâmetro e altura e probabilidade de mortalidade para todas as árvores da floresta em conjunto (Figura 3).

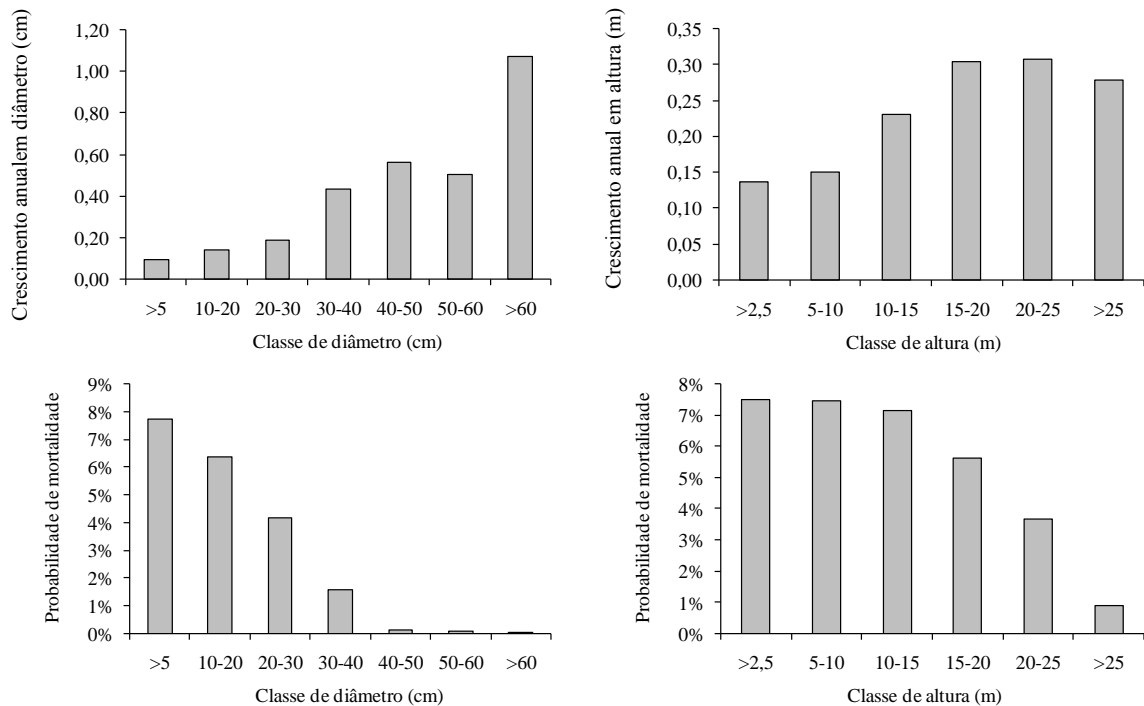


Figura 3 – Crescimento médio anual em diâmetro e altura, e probabilidade de mortalidade de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais.

Pode-se observar também, na Tabela 4, que as correlações para as espécies *Jacaranda macrantha*, *Machaerium floridum*, *Casearia arborea*, *Mabea fistulifera*, *Allophylus edulis*, *Sorocea bonplandii*, *Endlicheria paniculata*, *Maytenus robusta* apresentaram comportamentos contrários à tendência média de crescimento e/ou mortalidade observada para a média das árvores da floresta (Figura 3), as quais estão destacadas em negrito na tabela. Nestes casos, correlações positivas foram observadas para crescimento (diâmetro ou altura) e negativas para probabilidade de mortalidade para o índice IID5. Para os demais índices, foram verificadas correlações negativas para as variáveis de crescimento e positivas para probabilidade de mortalidade.

Naturalmente, diferentes comportamentos no crescimento e mortalidade podem ser estimulados por outros fatores, como por exemplo, características particulares de grupos ecológicos (TONINI et al., 2008), danos nas copas e presença de cipós (COSTA et al., 2008), e, até mesmo por fatores desconhecidos (JULIAN et al., 2001). Pela análise da Figura 4 pode-se constatar o comportamento contrário à tendência média para essas espécies.

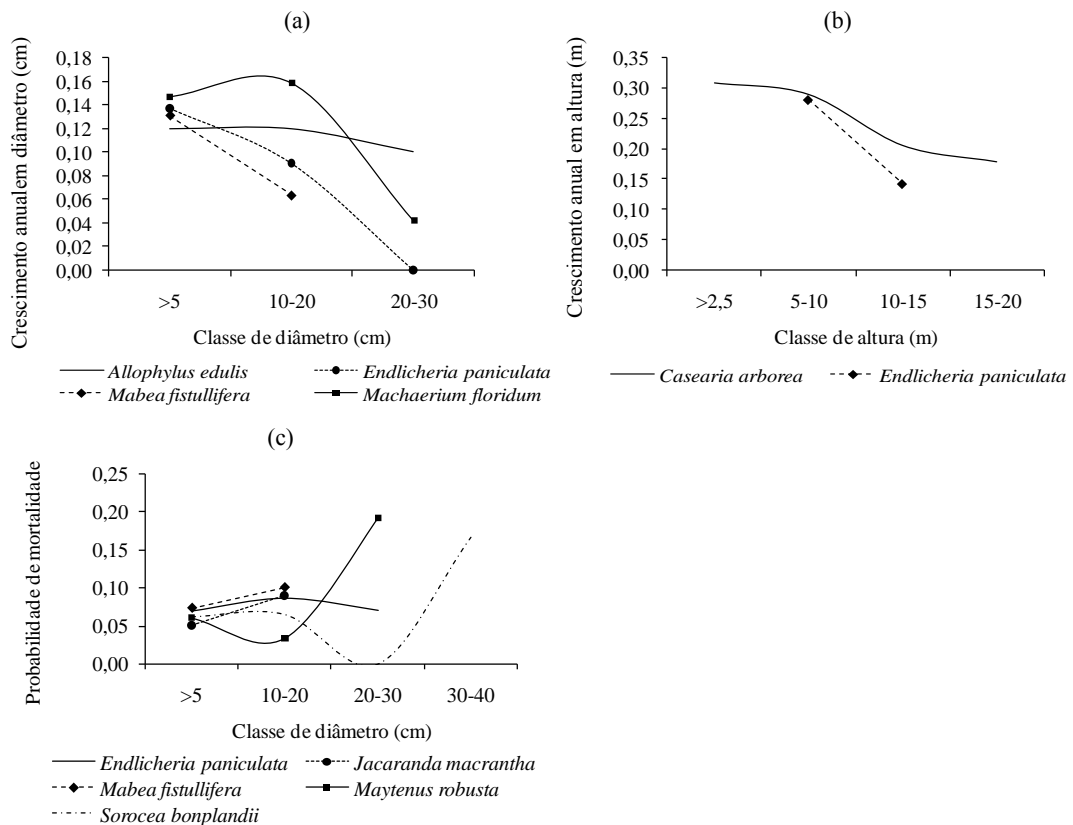


Figura 4 – Crescimento médio anual em diâmetro (a) e altura (b), e probabilidade de mortalidade (c) de árvores individuais de oito espécies que apresentaram sinais de correlação contrários à tendência média observada para o fragmento.

Erskine et al. (2005) observaram que algumas espécies de estágios sucessionais iniciais podem apresentar maior crescimento inicial e menor crescimento quanto atingem maior porte. Segundo Tonini et al. (2008) e Costa et al. (2008), essas espécies são adaptadas à colonização e por isso possuem altas taxas de crescimento na fase inicial de desenvolvimento.

Todas as espécies que apresentaram esse comportamento em relação às variáveis de crescimento (Δdap e ΔHt) pertencem aos grupos ecológicos das pioneiras ou secundárias iniciais, com exceção da espécie *Endlicheria paniculata*, que pertence ao grupo das secundárias tardias. Oliveira Júnior (1995), trabalhando em floresta secundária, observou diferença no crescimento da espécie *Vochysia maxima*, de acordo com o tamanho dos indivíduos, onde indivíduos de menores diâmetros também apresentaram maior crescimento anual em diâmetro do que aquelas de maiores diâmetros, o que normalmente não é esperado.

Não foi observada superioridade de um único índice para as espécies individuais e nem para a floresta como um todo. Isto indica que para cada variável e cada espécie, existe um índice de competição mais eficiente.

Na Tabela 5 é apresentado o número de ocorrências de correlações significativas com maiores valores (em módulo) e o valor de superioridade (VS) de cada índice de competição em relação às variáveis de crescimento em *dap* e *Ht*, bem como para a *Pm*.

Tabela 5 – Número de ocorrências e valor de superioridade (VS) dos índices de competição para cada categoria (IID, IDD e ISD), em relação às variáveis: crescimento em diâmetro (Δdap), crescimento em altura (ΔHt) e probabilidade de mortalidade (*Pm*) de árvores individuais de uma Floresta Estacional Semidecidual Montana

Índice de competição	Δdap		ΔHt		<i>Pm</i>	
	Nº de ocorrências	VS	Nº de ocorrências	VS	Nº de ocorrências	VS
IID1	0	0,0	2	1,0	3	1,4
IID2	10	7,2	3	1,4	7	6,4
IID3	0	0,0	1	1,7	3	2,5
IID4	3	0,9	4	1,4	3	1,3
IID5	4	4,3	1	0,6	9	4,4
IDD1/6	5	2,5	2	0,7	7	4,9
IDD2/6	4	1,0	4	1,6	1	0,3
IDD1/3	0	0,0	1	0,4	1	0,4
IDD2/3	1	0,3	2	0,5	0	0,0
ISD1/6	0	0,7	1	0,6	8	11,0
ISD2/6	11	12,7	2	2,5	3	2,8
ISD3/6	1	0,2	1	0,5	3	3,2
ISD4/6	2	1,2	5	6,3	2	1,3
ISD1/3	1	1,7	4	2,2	2	0,8
ISD2/3	0	0,0	2	1,6	1	0,3
ISD3/3	0	0,0	0	0,0	5	3,6
ISD4/3	1	0,4	1	0,3	1	0,6

em que VS é o valor de superioridade dos índices de competição, obtidos pelo somatório dos valores de importância (IVI%) das espécies que apresentaram o índice *i* com a maior correlação significativa (em módulo), em relação a cada variável, para cada categoria de índice de competição (IID, IDD e ISD); (/6) representa um raio competitivo de 6 m e (/3) um raio de 3 m.

De maneira geral, todas as categorias de índices de competição (IID, IDD e ISD) podem ser utilizadas em modelos de crescimento e mortalidade de árvores individuais. Os índices com maior VS também foram aqueles que apresentaram o maior número de ocorrências dentre as espécies analisadas, exceto para o IID3 para a variável ΔHt .

Assim sendo, para o crescimento em diâmetro houve superioridade do índice ISD2/6 e para o crescimento em altura, do índice ISD4/6. Para a probabilidade de mortalidade houve superioridade do índice ISD1/6.

Com relação ao raio de competição, para os índices dependentes e semi-independentes, foi observado superioridade para o raio de 6 m para todas as variáveis. Este raio de competição corrobora com estudos que também identificaram o mesmo raio de competição em outras formações florestais (BÉLAND et al., 2003).

4. CONCLUSÕES

Com este estudo pode-se concluir que:

- Existe correlação significativa entre índices de competição e o crescimento e a mortalidade de árvores no fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, em estágio médio de sucessão.
- Para o local de estudo, os índices semi-independentes da distância são indicados para o estudo de crescimento e de mortalidade regular.
- O raio de competição de 6 m é indicado para estimação de índices de competição na área de estudo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIG, R.J.; PARKS, P.J.; FARRAR Jr. R.M.; VASIEVIECH, J.M. **Regional timber yield and cost information for the South: Modelings techniques**. Washington: USDA, 1984. 28 p.

AMARO, M.A. **Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma floresta estacional semidecidual no município de Viçosa-MG**. 2010. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

APG III. An update of APG classification for the orders and families of flowering plants. APG III. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v.161, p.105-121, 2009.

BÉLAND, M.; LUSSIER, J.M.; BERGERON, Y.; LONGPRÉ, M.H.; BÉLAND, M. Structure, spatial distribution and competition in mixed jack pine (*Pinus banksiana*) stands on clay soils of eastern Canadá. **Annals of Forest Science**, v.60, p.609-617, 2003.

BIGGING, G.S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. **Forest Science**, v.41, n.2, p.360-377, 1995.

BIGGING, G.S.; DOBBERTIN, M. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer tree. **Forest Science**, v.38, n.3, p.695-720, 1992.

CANHAM, C.D., LEPAGE, P.T., COATES, K.D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. **Canadian Journal of Forest Research**, v.34, p.778-787, 2004.

CARVALHO, J.O.P. **Structure and dynamics of logged over Brazilian Amazonian rain forest**. 1992. 215 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – University of Oxford, Oxford, 1992.

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

CHASSOT, T.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G.; LONGHI, S.J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, v.21, p.303-313, 2011.

COATES, K.D., CANHAM, C.D., LEPAGE, C.T. Above versus below ground competitive effects and responses of a guild of temperate tree species. **Journal of Ecology**, v.97, p.118-130, 2009.

CONTRERAS, M.A.; AFFLECK, D., CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, v.262, p.1939-1949, 2011.

CORRÊA, G.F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa**. 1984. 87 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

COSTA, D.H.M.; SILVA, J.N.M.; CARVALHO, J.O.P. Crescimento de árvores em uma área de terra firme na floresta nacional do Tapajós após a colheita de madeira. **Revista de Ciências Agrárias**, n.50, p.63-76, 2008.

CUNHA, T.A. **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Floresta Amazônica**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DANIELS, R.F.; BURKHART, H.E.; CLASON, T.R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v.16, p.1230-1237, 1986.

DELLA-FLORE, J.B. **Modelos de crescimento para árvores singulares de *Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez. e *Ocotea puberula* Ness.** 2001. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

ERSKINE, P.D.; LAMB, D.; BORSCHMANN, G. Growth performance and management of a mixed rainforest tree plantation. **New Forest**, v.29, p.117-234, 2005.

FIGUEIREDO, L.T.M. **Dinâmica do estoque de carbono do fuste de árvores de uma Floresta Estacional Semidecidual**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

FOLI, E.G. **Crown dimensions and diameter growth of some tropical mixed forest trees in Ghana**. 1993. 185 f. Thesis - University of Aberdeen, 1993.

GANDOLFI, S.; LEITÃO FILHO, H.F.; BEZERRA, C.L. Levantamento florístico e caráter sucessional de espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta Mesófila Semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Revista Brasileira de Biologia**, v.55, n.4, p.753-767, 1995.

GLOVER, G.R.; HOOL, J.N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

GONZÁLEZ, M.S.; RÍO, M. DEL; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G. Distance independent tree diameter growth model for cork oak stands. **Forest Ecology and Management**, v.225, p.262-270, 2006.

HAMILTON Jr., D.A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of Northern Idaho. **Forest Science**, v.32, n.4, p.989-1000, 1986.

HASENAUER, H.; MONSERUD, R.A. A crown ratio model for Austrain forests. **Forest Ecology and Management**, v.84, p.49-60, 1996.

HEGYI, F. **A simulation model for managing jack-pine stands**. In: FRIES, G. Growth models for tree and stand population. Stockolm: Royal College of forestry, Research note, n.30, p.74-90, 1974.

HOLMES, M.J.; REED, D.D. Competition indices for mixed species northern hardwoods. **Forest Science**, v.37, n.5, p.1338-1349, 1991.

HYNYNEN, J. **Modelling tree growth for managed stands**. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 576, 1995, 59 p.

INMET – Instituto Nacional de Metrologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**, 2012. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso em: 07/06/2012.

JULIAN, C.F.; PETER, K.A.; HUIQUAN, B. Stochastic structure and individual tree growth models. **Forest Ecology and Management**, v.154, p.261-276, 2001, 1972.

KING, D.A.; MAINDONALD, J.H. Tree architecture in relation to leaf dimensions and tree stature in temperate and tropical rain forests. **Journal of Ecology**, v.87, p.1012-1024, 1999.

LEDERMAN, T. Evaluating the performance of semi-distance-independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v.40, p.796-805, 2010.

LIEBERMAN, D.; PUTZ, F.E. The dynamis of tree populations in tropical forest: a review. **Journal of Tropical Ecology**, n.3, p.359-366, 1987.

LORIMER, C.G. Test of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, p.343-360, 1983.

MARTIN, G.L.; EK, A.R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, v.30, n.3, p.731-743, 1984.

MARTINS, F.B.; SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L.; CASTRO, R.V.O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1089-1098, 2011.

MEIRA NETO, J.A.A.; MARTINS, F.R. Estrutura da Mata da Silvicultura, uma Floresta Estacional Semidecidual Montana no município de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v.24, n.2, p.151-160, 2000.

MONSERUD, R.A.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even-and-uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and management**, v.80, p.57-80, 1996.

OHEIMB, G.V.; LANG, A.C.; BRUELHEIDE, H.; FORRESTER, D.I.; WÄSCHE, I.; YU, M.; HÄRDITL, W. Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: The role of local neighbourhood competition. **Forest Ecology and Management**, v.261, p. 499-507, 2011.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.C.; DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v.29, n.1, p.9-15, 2005.

PELTONIEMI, M.; MÄKIPÄÄ, R. Quantifying distance-independent tree competition for predicting Norway spruce mortality in unmanaged forests. **Forest Ecology and Management**, v.261, p.30-42, 2011.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKÝ, J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**, v.162, n.1, p.3-21, 2002.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. IICA/BMZ/GTZ. 1997, 561 p.

PUKKALA, T.; KOLSTRÖM, T. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. **Silva Fennica**, v.21, n.1, p.55-67, 1987.

QUICKE, H.E., MEHLDAHL, R.S., KUSH, J.S. Basal area growth of individual trees: a model derived from a regional longleaf pine growth study. **Forest Science**, v.40, n.3, p.528-542, 1994.

RADTKE, P.J., WESTFALL, J.A., BURKHART, H.E. Conditioning a distance-dependent competition index to indicate the onset of inter-tree competition. **Forest Ecology and Management**, v.175, p.17-30, 2003.

REZENDE, S.B. **Estudo de cronotoposequência em Viçosa-MG**. 1971. 71 f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1971.

ROSSI, L.M.B.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Revista Floresta**, v.37, n.2, p.275-291, 2007.

SIRONEN, S.; KANGAS, A.; MALTAMO, A.; KANGAS, J. Estimating individual tree growth with the k-Nearest Neighbour and k-Most Similar Neighbour methods. **Silva Fennica**, v.35, n.4, p. 453-467, 2002.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-137. Washington, DC, 1973. 32 p.

STAGE, A.R., LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, v.38, n.4, p.890-898, 2008.

STERBA, H.; BLAB, A.; KATZENSTEINER, K. Adapting an individual tree growth model for Norway Spruce (*Picea abies* L. Karst.) in pure and mixed species stands. **Forest Ecology and Management**, v.159, p.101-110, 2002.

TOMÉ, M.; BURKHART, H.E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual tree. **Forest Science**, v.35, n.3, p.816-831, 1989.

TONINI, H.; OLIVEIRA, M.M.C.; SCHWENGBER, D. Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. **Ciência Florestal**, v.18, n.2, p.151-158, 2008.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 123 p.,1991.

WEBER, P.; BUGMANN, H. FONTI, P.; RIGLING, A. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. **Forest Ecology and Management**, v.254, n.1, p.96-106, 2008.

WYKOFF, W.R. A basal area increment model for individual conifers in the northern rocky mountains. **Forest Science**, v.36, n.4, p.1077-1104, 1990.

ZHAO, D.; BORDERS, B.; WILSON, M.; RATHBUN, S.L. Modeling neighborhood effects on the growth and survival of individual trees in a natural temperate species rich forest. **Ecological Modelling**, v.196, n.1, p.90-102, 2006.

CAPÍTULO II

EFICIÊNCIA DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS NA ESTIMAÇÃO DE MORTALIDADE EM UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL

RESUMO – Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de redes neurais artificiais para a estimação da mortalidade regular de árvores individuais em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual. Foram utilizados dados de dez parcelas permanentes, monitoradas durante 14 anos, em cinco ocasiões, localizadas no município de Viçosa, Minas Gerais. O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois grupos: grupo de treinamento, composto por seis parcelas e totalizando 3.556 casos nas cinco medições, onde foram observados 231 casos de mortalidade e o grupo de generalização, composto por quatro parcelas, as quais foram utilizadas na simulação da mortalidade, totalizando 2.062 casos, sendo observados 181 casos de mortalidade. Foram avaliadas redes para estimativas da mortalidade das árvores de forma qualitativa e quantitativa. A primeira trata-se da qualificação das árvores em viva ou morta entre dois períodos de medição (rede de classificação). A segunda refere-se à estimativa da probabilidade de mortalidade de cada árvore entre dois períodos de medição (rede para aproximação de funções), que foi aplicada juntamente com a regra de mortalidade proposta por Pretzsch et al., (2002), baseada na comparação da probabilidade estimada com um dado número aleatório. Além disso, foram avaliadas diferentes arquiteturas e modelos de redes (*Multilayer Perceptron*- MLP e *Radial Basis Function*- RBF). As funções de ativação empregadas para as redes MLP foram: identidade, logística, tangencial e exponencial. Como variáveis de entrada foram definidas variáveis numéricas (*dap*, altura total, ano de medição e índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes da distância) e variáveis categóricas (nível de infestação por cipós, nível de iluminação das copas, qualidade da copa, grupo ecológico e família botânica). O emprego de redes neurais para aproximação de funções (estimativa da probabilidade de mortalidade) foi eficiente para predição da mortalidade. A rede MLP: 60-14-1, com função de ativação exponencial, utilizando o índices de competição dependente da distância, foi a mais eficiente para estimar a mortalidade.

Palavras-Chave: Floresta Natural Semidecidual Montana, floresta inequiânea, mortalidade regular de árvores individuais.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de crescimento e produção florestal são importantes para predição do crescimento e permitem simular a dinâmica natural, sob hipóteses de exploração ou sujeito a agentes físicos e bióticos (TOMÉ, 1991; VANCLAY, 1994). Eles podem ser divididos de acordo com o nível de informação, composto por uma única equação ou por um conjunto de equações (VANCLAY, 1994).

Dentre os componentes dos modelos, a mortalidade é o mais difícil de modelar (HAMILTON Jr., 1986; HAMILTON Jr., 1990; FLEWELLING e MONSERUD, 2002; YANG et al., 2003; MARTINS, 2011).

As árvores morrem por competição, injúrias, doenças ou simplesmente porque atingiram a rotação silvicultural. Quando a morte ocorre por ações antrópicas, ela é definida como irregular. Este tipo de mortalidade também ocorre devido à danos por pragas, ventos ou incêndios (STAEBLER, 1953; CAMPOS e LEITE, 2009), não sendo possível a sua estimativa.

A mortalidade regular ocorre devido a competição entre as árvores, ou pela própria idade da árvore (DIXON, 2011, apud GROOM et al., 2012). Por se tratar de fatores previsíveis, é possível sua estimativa (MONSERUD, 1976; ZHAO et al., 2006; MARTINS, 2011; CASTRO, 2011; GROOM et al., 2012).

O método mais utilizado em estudos de mortalidade de árvores individuais consiste em estimar a probabilidade de mortalidade de cada indivíduo dentro de determinado período de crescimento em função de um conjunto de características do povoamento e da própria árvore (HASENAUER et al., 2001). Neste caso, a decisão final se uma árvore vive ou morre durante uma simulação cabe à comparação da probabilidade estimada com um número aleatório (entre zero e um). Caso o número

aleatório seja menor que a probabilidade calculada, a árvore é eliminada da listagem (morta) (PRETZSCH et al., 2002).

Alternativamente, as probabilidades de mortalidade podem ser interpretadas como proporções e o número de árvores vivas pode ser reduzido da listagem a partir da proporção predita (ROSSI, et al., 2007; MARTINS, 2011).

Na modelagem da mortalidade de árvores, é habitual prever a probabilidade de mortalidade com funções sigmóides assintóticas (Logística, Gompertz, Weibull, Chapman-Richards, etc.), pois nessas funções, os valores preditos ficam limitados entre 0 e 1 (HAMILTON Jr. e EDWARDS; 1976). Esse método é consagrado para prever a mortalidade de árvores em florestas homogêneas em todo o mundo (HAMILTON Jr., 1986; YAO et al., 2001; HURST et al., 2012).

Em florestas inequívocas com grande diversidade, são poucos os estudos de mortalidade em nível de árvore individual. Possivelmente, devido à ausência de dados adequados para a modelagem e pelos diferentes comportamentos de mortalidade entre as espécies (VANCLAY, 1994; HAMILTON Jr., 1986). A obtenção de uma equação de mortalidade para cada espécie é impraticável, devido ao grande número de espécies e reduzido número de dados (baixa abundância) para muitas delas, o que impediria o desenvolvimento de relações confiáveis (ROSSI et al., 2007).

As redes neurais artificiais (RNA) surgem, então, como alternativa eficiente para o estudo de mortalidade de árvores (HASENAUER e MERKL, 1997), principalmente neste tipo de florestas, pela possibilidade de inclusão de variáveis independentes qualitativas como: características de sanidade das árvores, grupos ecológicos, famílias botânicas, dentre outras, que influenciam diretamente na mortalidade.

Redes neurais podem ser aplicadas em problemas de aproximação de funções, classificação de padrões, análise de séries temporais e reconhecimento de padrões (JAIN et al., 1996; HAYKIN, 2001; BARRETO, 2002, BINOTI, 2010). O método de aprendizagem das redes neurais pode ser supervisionado, quando o usuário indica as variáveis de entradas e de saídas ou não-supervisionado, quando não existe um agente externo indicando a resposta desejada para os padrões de entrada (HAYKIN, 2001).

A aprendizagem supervisionada tem sido a mais empregada na Ciência Florestal (DIAMANTOPOULOU, 2005; GÖRGENS et al., 2009; BINOTI, 2010; LEITE et al., 2010; CASTRO, 2011), e o algoritmo mais conhecido é o de retropropagação do erro (*back-propagation*).

A arquitetura de uma RNA consiste na maneira como os neurônios estão estruturados e suas conexões, ou seja, número de camadas da rede, número de neurônios em cada camada e tipo de conexão entre os neurônios (BRAGA et al., 2000).

Os principais tipos de redes utilizadas na área florestal são as *Multilayer Perceptron* (MLP) e *Radial Basis Function* (RBF). Redes MLP são redes multicamadas alimentadas adiante, que possuem uma ou mais camadas de neurônios entre as camadas de entrada e saída, chamada de camada oculta, que conseguem extrair padrões não-lineares dos dados (LIPPNANN, 1987, BRAGA et al., 2000).

Neste modelo todos os neurônios são ligados aos neurônios da camada subsequente, não havendo ligação com os neurônios laterais (da mesma camada) e também não ocorre realimentação. As redes RBF são utilizadas nas mesmas aplicações que as redes MLP, e são muito semelhantes (HAYNKIN, 2001). Como características principais, as RBF sempre apresentam uma única camada intermediária (oculta); os neurônios da camada de saída são sempre lineares; os neurônios da camada intermediária têm funções de base radial (gaussianas) como função de ativação, ao invés de funções sigmóidais, aplicadas nas redes MLP (BRAGA et al., 2000).

O uso da técnica de RNA's para prever a mortalidade de árvores é recente na área florestal. Guan e Gertner (1991) construíram um modelo utilizando redes RBF obtendo estimativas precisas de mortalidade para árvores de *Pinus*. Hasenauer e Merkl (1997) estimaram mortalidade de *Picea abies* na Áustria e Castro (2011) utilizou redes MLP para estimar a mortalidade de árvores de *Eucalyptus* no Brasil. Uma limitação desses estudos empregando RNA é a decisão quanto a qualificação de uma árvore como viva ou morta pela comparação da probabilidade predita com um dado número aleatório.

Outra possibilidade de utilização das redes neurais é para classificação, ou seja, em estudos de mortalidade, a própria rede pode prever o *status* da árvore após algum intervalo de tempo, como viva ou morta.

Diante da possibilidade de utilização das redes neurais na predição da mortalidade de árvores em florestas, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar a eficiência de diferentes arquiteturas de redes neurais RBF e MLP na estimação de mortalidade em nível de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. *Dados*

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos no município de Viçosa, Minas Gerais, em um fragmento florestal pertencente à Universidade Federal de Viçosa, que possui 17 ha de área (42°52'W e 42° 50'W de longitude e 20° 44'S e 20° 47'S de latitude), pertencente à região fitoecológica de Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão.

Para o desenvolvimento do trabalho foi amostrado um hectare, dividido em dez parcelas retangulares, não contínuas, de 1.000 m² cada (20m x 50m), distribuídas aleatoriamente no fragmento (MEIRA NETO e MARTINS, 2000).

Em cada parcela, foram identificadas as árvores e mensurados os diâmetros a 1,3 m de altura (*dap*) e a altura total (*Ht*) de todas as árvores com *dap* ≥ 5 cm, bem como identificados os indivíduos que morreram entre cada medição sucessiva, que foram realizadas nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008. Para cada árvore foram determinadas as coordenadas x e y em relação à origem da sua parcela, para criação de um mapa de localização dos indivíduos e cálculo dos índices de competição.

Todos os indivíduos mensurados foram classificados em relação aos níveis de infestação por cipós, iluminação de copa e qualidade de copa (SILVA e LOPES, 1984), e em grupos ecológicos (GANDOLFI et al., 1995), conforme classificação proposta na Tabela 1. As principais características quantitativas do povoamento estudado encontram-se na Tabela 2.

Tabela 1– Critérios para classificação dos indivíduos em relação à infestação por cipós, iluminação de copa, qualidade da copa e grupo ecológico

Critérios para classificação	Classe
<i>Infestação por Cipós</i>	
Sem presença de cipós	1
Presença de cipós somente no fuste	2
Presença de cipós somente na copa	3
Presença de cipós no fuste e na copa	4
<i>Iluminação de copa</i>	
Copa recebendo radiação solar direta na sua parte superior e lateral	1
Copa recebendo radiação solar direta na sua parte superior	2
Ausência de radiação solar direta na copa	3
<i>Qualidade da copa</i>	
Boa: copa normal, sem presença de danos	1
Regular: copa com algum dano de pequena escala	2
Inferior: copa com severos danos, com poucos galhos e folhas	3
<i>Grupo Ecológico</i>	
Espécies dependentes de luz e que não ocorrem no sub- bosque, se desenvolvendo em clareiras ou bordas da floresta	Pioneiras (PI)
Desenvolvem-se em condições de sombreamento médio, como pequenas clareiras e sub-bosque não densamente sombreado	Secundárias iniciais (SI)
Desenvolvem-se no sub-bosque em condições de sombra leve ou densa, podendo crescer até alcançar o dossel	Secundárias tardias (ST)
Espécies que em função da carência de informações não foram incluídas em nenhuma das categorias	Sem classificação (SC)

Tabela 2 – Sumário dos dados do inventário no fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizado em Viçosa - Minas Gerais

Variável	Ano de medição				
	1994	1997	2000	2004	2008
dap mínimo (cm)	5,1	5,1	5,1	5,1	5,0
dap médio (cm)	11,6	11,8	12,0	12,0	12,2
dap máximo (cm)	80,2	82,1	84,0	85,6	91,0
q (cm)	14,2	14,6	14,9	15,0	15,3
Ht mínima (m)	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4
Ht média (m)	10,4	11,1	11,4	12,4	12,5
Ht máxima (m)	32,1	32,4	33,0	39,2	39,4
Área basal (m ² ha ⁻¹)	24,1	25,9	26,2	26,2	27,5
Volume (m ³ ha ⁻¹)	235,5	275,2	291,4	323,9	342,1
Famílias botânicas	43	43	43	42	42
Gêneros botânicos	100	98	99	99	103
Espécies identificadas	136	135	137	135	148
Espécies não identificadas	4	3	4	3	5
Número de fustes (ha)	1521	1540	1497	1474	1492
Densidade (árvores ha ⁻¹)	1379	1383	1331	1307	1326
Índice de Shannon-Weaver (H')	4,07	4,02	4,00	3,96	4,02
Número de indivíduos ingressos (ha)*	-	114	79	57	134
Número de indivíduos mortos (ha)*	-	95	122	80	115

* Refere-se ao número de indivíduos ingressos / mortos desde a medição imediatamente anterior.

O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois grupos, com restrições de representatividade da variabilidade dos dados em cada grupo. O primeiro refere-se aos dados para treinamento de redes neurais artificiais, composto por seis parcelas, totalizando 3.556 casos nas cinco medições, onde foram observados 231 casos de mortalidade. O segundo refere-se aos dados para a generalização, composto por quatro parcelas, as quais foram utilizadas na simulação da mortalidade, totalizando 2.062 casos, sendo observados 181 casos de mortalidade.

2.2. Índices de competição

Para cada fuste (unidade básica do estudo), em cada medição, foram estimados três índices de competição, sendo um índice independente da distância (IID), um índice dependente da distância (IDD) e um semi-independente da distância (ISD), selecionados em estudos preliminares como potenciais para a estimativa da variável de mortalidade, sendo:

$$IID = \frac{Ht_i}{\overline{Ht}} \quad (1)$$

$$IDD = \frac{n_j}{\sum_{j=1}^{n_j} DAP_j \cdot L_{ij}} \quad (2)$$

$$ISD = \frac{DAP_i^2}{\overline{D_n}^2} \quad (3)$$

em que: Ht_i = altura total do fuste da árvore-objeto (m); \overline{Ht} = altura média dos fustes da unidade amostral (m); dap_i = diâmetro com casca (dap) do fuste da árvore-objeto medido a 1,30 m (cm); dap_j = diâmetro com casca (dap) do fuste da árvore competidora medido a 1,30 m (cm); L_{ij} = distância entre a árvore-objeto e a árvore competidora (cm); n_j = número de fustes competidores limitados a um raio de competição de 6 m; $\overline{D_n}$ = média aritmética dos diâmetros de n fustes das árvores próximas da árvore-objeto (cm), limitadas a um raio de competição de 6 m.

2.3. Mortalidade

Em cada intervalo de medição, foram contabilizados aqueles indivíduos que morreram. A probabilidade de mortalidade (Pm) foi obtida calculando-se a proporção de fustes mortos por classe de diâmetro, para cada parcela, entre os intervalos de medição (adaptado de MARTINS, 2011; CASTRO, 2011).

$$Pm = 100 \cdot \frac{(n_{j1} - n_{j2}) - I_{j1j2}}{\sum_{i=1}^j n_{j1}} \quad (4)$$

em que n_{j1} é o número de fustes vivos na j -ésima classe de diâmetro, no início do período, n_{j2} é o número de fustes vivos na j -ésima classe de diâmetro no fim do período, descontados os indivíduos ingressos entre os períodos sequentes (I_{j1j2}).

2.4. Treinamento das redes neurais artificiais

Na construção e treinamento das redes neurais, utilizou-se o *software* Statistica 10.0 (STATSOFT, INC, 2012), sendo testadas diferentes arquiteturas de redes MLP (*Multilayer Perceptron*) e RBF (*Radial Basis Function*).

Para as redes MLP, foram avaliadas combinações de quatro diferentes funções de ativação nas camadas intermediária e de saída (identidade, logística, tangencial e exponencial). Para as redes RBF, os neurônios da camada de saída foram sempre lineares (função identidade) e os neurônios da camada intermediária, função de base radial (gaussiana) como função de ativação.

As redes foram treinadas para classificação de padrões e para aproximação de funções. No primeiro caso, o objetivo foi qualificar as árvores como viva ou morta, entre dois períodos de medição, sendo essas redes representadas pela letra M. No segundo, o objetivo foi obter a estimativa da probabilidade de mortalidade de cada árvore entre dois períodos de medição (P_m).

Os treinamentos foram do tipo *feedforward*, pelo método supervisionado e as variáveis de entrada foram selecionadas com base na possível relação com a variável de saída analisada. Foram treinadas 1.800 redes para a variável categórica M e 1.800 redes para a variável quantitativa P_m (Tabela 3).

Tabela 3 – Variáveis utilizadas no treinamento das RNA para estimativa da mortalidade de árvores em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, no município de Viçosa, MG

Número da Rede	Tipo	Saída	Entradas Numéricas	Entradas Categóricas	Total de redes treinadas
1 a 300	MLP	M	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IID	F, GE, C, IC, QC	900
301 a 600	MLP	M	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IDD	F, GE, C, IC, QC	
601 a 900	MLP	M	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , ISD	F, GE, C, IC, QC	
901 a 1.200	RBF	M	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IID	F, GE, C, IC, QC	900
1.201 a 1.500	RBF	M	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IDD	F, GE, C, IC, QC	
1.501 a 1.800	RBF	M	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , ISD	F, GE, C, IC, QC	
1.801 a 2.100	MLP	Pm	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IID	F, GE, C, IC, QC	900
2.101 a 2.400	MLP	Pm	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IDD	F, GE, C, IC, QC	
2.401 a 2.700	MLP	Pm	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , ISD	F, GE, C, IC, QC	
2.701 a 3.000	RBF	Pm	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IID	F, GE, C, IC, QC	900
3.001 a 3.300	RBF	Pm	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , IDD	F, GE, C, IC, QC	
3.301 a 3.600	RBF	Pm	A_1, A_2, dap_1, Ht_1 , ISD	F, GE, C, IC, QC	

em que MLP são redes *Multilayer Perceptron* e RBF, redes *Radial Basis Function*; M é a saída categórica que qualifica o indivíduo como vivo ou morto entre dois períodos de medição, Pm é a probabilidade de mortalidade entre dois períodos de medição; A_1 e A_2 são os anos de medição atual e futuro, respectivamente; dap_1 é o diâmetro a 1,3 m de altura (cm) atual; Ht_1 é a altura total atual; IID, IDD e ISD são os índices de competição independente, dependente e semi-independente da distância, respectivamente; F é a família botânica do indivíduo; GE é o grupo ecológico; C é o nível de infestação por cipó; IC é o nível de iluminação da copa e QC é o nível de qualidade da copa.

2.5. Avaliação do treinamento das redes neurais artificiais

Após os treinamentos, foi selecionada a melhor rede de cada tipo (MLP e RBF) e cada índice de competição utilizado, para as variáveis M e Pm .

Para selecionar as redes de classificação da mortalidade (M) foi avaliado o número estimado de árvores mortas que mais se aproximasse do valor verdadeiro, assim como a taxa estimada de classificações corretas em cada rede, ou seja, se as árvores classificadas como mortas foram aquelas que realmente morreram.

As melhores redes para estimar a probabilidade de mortalidade (Pm) foram selecionadas de acordo com o coeficiente de correlação entre as probabilidades estimadas e observadas, associado ao número médio de árvores qualificadas corretamente.

Após obter a probabilidade de mortalidade (Pm) para cada indivíduo, foi, também, gerado um número aleatório (Pa) entre zero e um, sendo este comparado à probabilidade estimada. A regra de decisão para definir se a árvore morria baseou-se em: se $Pm > Pa$ o indivíduo morre, caso contrário, permanece vivo (PRETZSCH et

al.,2002). Este procedimento foi repetido 30 vezes, a fim de se obter uma tendência média das mortalidades para cada rede.

Cabe destacar que, antes do emprego dessa metodologia, foi aplicada a regra (PRETZSCH et al., 2002) aos dados observados de P_m (dados de treinamento) para avaliar sua eficiência para os dados em estudo.

2.6. Generalização das redes neurais artificiais

Após a seleção das melhores redes no treinamento, procedeu-se à generalização empregando os dados independentes. As projeções foram realizadas para a medição imediatamente posterior, ou seja, de 1994 para 1997; de 1997 para 2000; de 2000 para 2004 e de 2004 para 2008. A aplicação das redes treinadas aos dados de generalização foi feita no *software* Statistica 10.0.

Para avaliar o poder de generalização das redes M e P_m , foi avaliado o número de árvores mortas estimados em relação ao valor verdadeiro e a taxa de classificações corretas em cada rede. Para cada rede P_m foram realizadas 30 repetições utilizando-se a regra proposta por Pretzsch et al., (2002). A repetição que mais se aproximou do valor médio das 30 repetições foi a selecionada para as análises posteriores.

Foram selecionadas do total, as duas melhores redes com poder generalista e foram elaborados gráficos de barras para comparar os dados projetados com os dados reais, de acordo com as seguintes variáveis:

- a) frequência de indivíduos mortos entre cada período de medição;
- b) frequência de indivíduos mortos em relação às variáveis qualitativas (nível de infestação por cipós, nível de iluminação das copas, nível de qualidade das copas e grupo ecológico), utilizadas como variáveis categóricas de entrada;
- c) frequências de indivíduos vivos e mortos por classe de diâmetro e de altura, em relação às distribuições observadas no último ano de medição (2008);
- d) frequência de mortalidade para cada família botânica presente na área estudada.

Para verificar a aderência das estimativas de mortalidade das redes selecionadas com os valores reais, utilizou-se o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (SOKAL e ROHLF, 1969), cuja estatística é dada por:

$$dn = \text{Max}|F_o(x) - F_e(x)| \quad (5)$$

em que: dn é o valor calculado da estatística de K-S; $F_o(x)$ é a frequência acumulada observada; $F_e(x)$ é a frequência acumulada estimada.

A hipótese nula (H_0 : as estimativas não diferem dos valores reais) foi rejeitada para o valor calculado de dn maior que o valor tabelado, ao nível de significância α igual a 5%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eficiência da metodologia proposta por Pretzsch et al., (2002) como regra para qualificação das árvores como mortas, após calculadas as probabilidades, foi comprovada para os dados de treinamento. Após 30 repetições, verificou-se uma média de árvores qualificadas como mortas de 229 ± 12 , sendo o valor real igual a 231 (Figura 1).

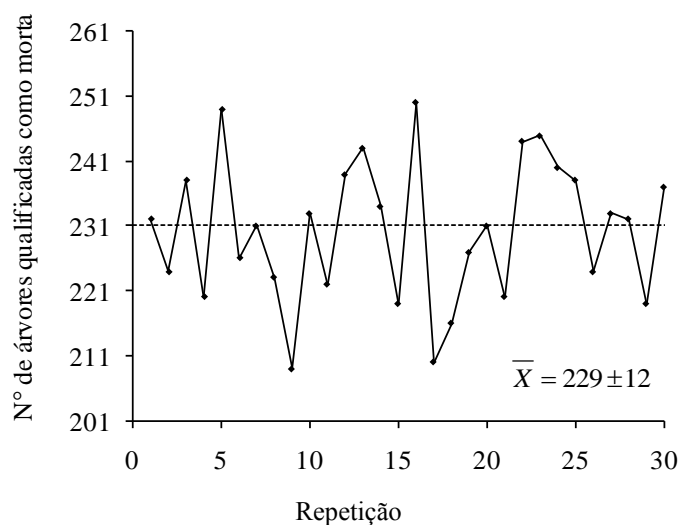


Figura 1 – Estimativas do número de árvores mortas aplicando a metodologia proposta por Pretzsch et al., (2002) aos dados observados de treinamento das redes neurais artificiais.

As melhores redes neurais selecionadas para estimar a mortalidade (M) e a probabilidade de mortalidade (P_m) são apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Resumo das redes neurais artificiais selecionadas para qualificação da mortalidade de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, Viçosa, MG

Redes selecionadas	Índice de Competição	Tipo	Arquitetura*	Saída (categórica)	Função de ativação		Treinamento		Generalização	
					Camada intermediária	Camada de saída	Nº de mortes (231)	Taxa de acerto de Mortalidade	Nº de mortes (181)	Taxa de acerto de Mortalidade
1	IID	MLP	60-42-1	M	Logística	Logística	78	23,8%	37	8,3%
2	IID	RBF	60-182-1	M	Gaussiana	Identidade	102	10,4%	55	5,5%
3	IDD	MLP	60-31-1	M	Tangencial	Tangencial	228	47,6%	38	8,8%
4	IDD	RBF	60-200-1	M	Gaussiana	Identidade	98	12,2%	27	4,4%
5	ISD	MLP	60-56-1	M	Logística	Exponencial	75	14,4%	39	3,3%
6	ISD	RBF	60-107-1	M	Gaussiana	Identidade	18	10,5%	33	3,9%

em que MLP são redes *Multilayer Perceptron* e RBF, redes *Radial Basis Function*; (*) indica o número de neurônios da camada de entrada, intermediária e saída, respectivamente; M é a variável de saída categórica que indica o *status* da árvore como viva ou morta entre os anos de medição.

As redes em formato “.xml” ou “.snn” podem ser obtidas por e-mail: <castrorvo@ymail.com>.

Tabela 5 – Resumo das redes neurais artificiais selecionadas para estimação da probabilidade de mortalidade de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, Viçosa, MG

Redes selecionadas	Índice de Competição	Tipo	Arquitetura*	Saída (numérica)	Função de ativação		Treinamento			Generalização		
					Camada Intermediária	Camada de saída	Nº de mortes (231)	Taxa de acerto de Mortalidade	r_{yy}	Nº de mortes (181)	Taxa de acerto de Mortalidade	r_{yy}
7	IID	MLP	60-12-1	P_m	Exponencial	Exponencial	237 ± 14	8,7%	0,49	164 ± 12	5,5%	0,35
8	IID	RBF	60-21-1	P_m	Gaussiana	Identidade	238 ± 17	7,0%	0,26	166 ± 13	5,1%	0,17
9	IDD	MLP	60-14-1	P_m	Exponencial	Exponencial	233 ± 15	12,1%	0,58	175 ± 10	5,8%	0,41
10	IDD	RBF	60-21-1	P_m	Gaussiana	Identidade	240 ± 17	7,1%	0,25	168 ± 13	5,2%	0,08
11	ISD	MLP	60-11-1	P_m	Exponencial	Logística	239 ± 15	8,9%	0,49	165 ± 12	5,8%	0,25
12	ISD	RBF	60-21-1	P_m	Gaussiana	Identidade	237 ± 16	7,0%	0,14	166 ± 13	5,1%	0,05

em que MLP são redes *Multilayer Perceptron* e RBF, redes *Radial Basis Function*; (*) indica o número de neurônios da camada de entrada, intermediária e saída, respectivamente; P_m é a variável de saída numérica que estima a probabilidade de mortalidade da árvore entre os anos de medição.

As redes em formato “.xml” ou “.snn” podem ser obtidas por e-mail: <castrorvo@ymail.com>.

A variável “nome científico” (espécie) não foi utilizada como variável de entrada no treinamento das redes neurais, para que as redes adquirissem maior poder generalista, ou seja, não seriam eficientes para estimarem a mortalidade apenas daquelas espécies presentes no treinamento.

Dentre as redes com a saída categórica M (Tabela 4), a rede 3 (MLP) foi a única rede que apresentou boa performance durante o treinamento das redes para classificação, com a estimativa do número de árvores mortas (228) mais próxima ao valor observado (231). Entretanto, durante a generalização foi observado subestimação do número de árvores mortas.

Desta forma, observou-se que as redes para classificação M não foram eficientes para este estudo. Uma possível causa para esta ineficiência é a baixa frequência de ocorrência de mortalidade diante do grande número de dados de árvores vivas.

As redes 7 e 9 (MLP) resultaram nas estimativas mais precisas de probabilidade de mortalidade nas etapas de treinamento e generalização (Tabela 5).

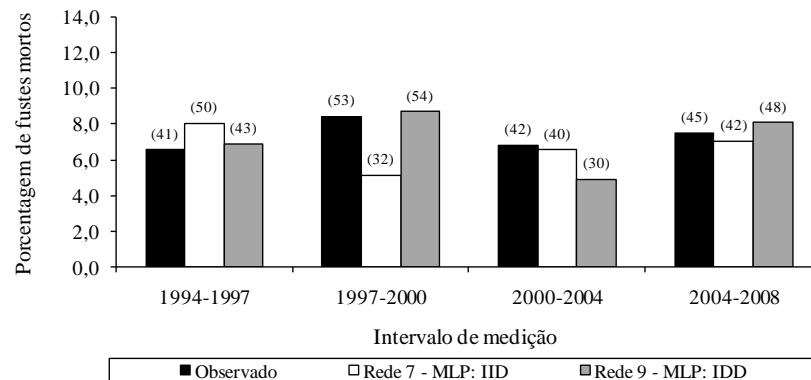
Dentre as redes para a variável P_m , nenhuma apresentou boa precisão nas taxas de acerto de mortalidade durante o treinamento e generalização, sendo observadas taxas inferiores a 13%, o que indica que os indivíduos qualificados como mortos não foram aqueles que realmente morreram.

Entretanto, essa precisão não é fundamental na modelagem em nível de árvore individual. O importante é que durante a simulação, as árvores mortas possuam características de tamanho e sanidade próximas àquelas que realmente morreram e que ocorram no período de tempo correto, resultando assim, em estimativas precisas em termos de dinâmica do povoamento.

Vários estudos já reportaram a dificuldade de estimar a mortalidade de árvores, por se tratar de um evento raro, aleatório, extremamente variável, e não ter uma periodicidade de ocorrência definida (LEE, 1971; CRESCENTE-CAMPO et al., 2009, MARTINS, 2011). No entanto, neste estudo foram observadas estimativas consistentes com o uso das redes que estimam a P_m . Isto indica que as RNA, especialmente para florestas naturais inequânneas, constituem um campo propício à investigação científica na mensuração e modelagem florestal.

A frequência de mortalidade observada entre os intervalos de medição variou de 6,5 a 8,4 %, entre os anos de 1994 a 1997 e 2000 a 2004, respectivamente (Figura

2). As estimativas das redes 7 e 9 foram estatisticamente iguais aos valores observados.



Teste K-S a 5% de significância - Rede 7: 0,078^{n.s.}; Rede 9: 0,042^{n.s.}

Figura 2 – Porcentagem de indivíduos mortos observados e estimados pelas redes 7 e 9 para os dados de generalização, entre os intervalos de medição.

Os valores sobre as barras, entre parênteses, representam o número de indivíduos qualificados como mortos. “n.s” indicam diferenças não significativas a 5% de significância.

O valor médio de mortalidade anual observado no povoamento foi de 2%, corroborando com as taxas médias de mortalidade de árvores em outras formações de florestas tropicais. Köhler et al. (2001) observaram valores de mortalidade entre 1 e 2 % ao ano, para florestas tropicais primárias na Malásia. Em uma floresta explorada na Costa Rica, Finegan e Camacho (1999) observaram taxas de mortalidade entre 1,6 e 2,3 % ao ano. Os valores do presente trabalho foram ligeiramente inferiores aos encontrados por Pulz (1998), que observou taxas anuais de mortalidade entre 2,0 e 3,6% e Coraiola (2003) que verificou uma taxa anual de 2,78%.

A mortalidade regular em florestas naturais em estágio médio de sucessão é um evento natural, não indicando decrepitude do povoamento, ao contrário do povoamento equiâneo, onde a mortalidade pode reduzir a produção por unidade de área. A floresta natural passa por uma dinâmica contínua, e o equilíbrio é atingido quando as árvores mortas são continuamente substituídas por novos indivíduos (ROSSI et al., 2007).

Na Figura 3 são apresentadas as previsões de mortalidade em função do nível de infestação por cipós (a), iluminação de copas (b) e qualidade das copas (c).

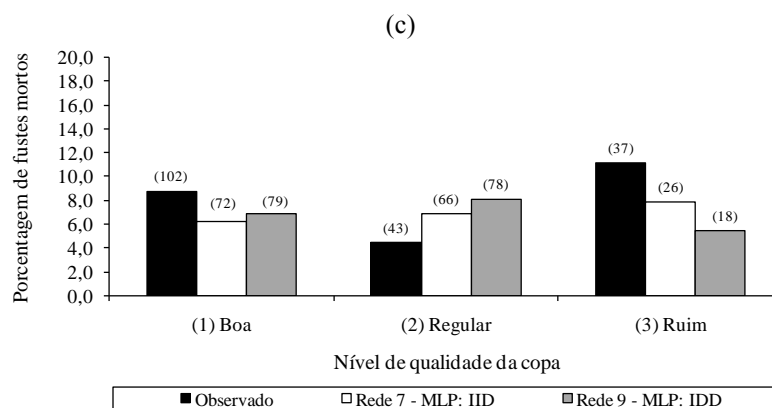
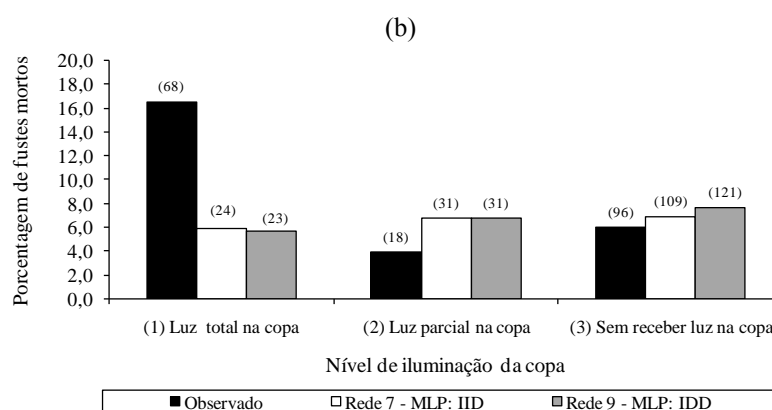
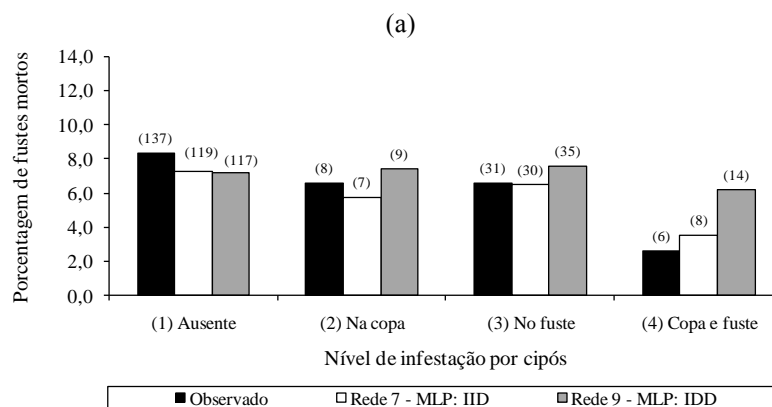


Figura 3—Porcentagem de indivíduos mortos observados e estimados pelas redes 7 e 9 para os dados de generalização, em relação aos níveis de infestação por cipós (a), iluminação da copa (b) e qualidade da copa (c), em um período de 14 anos.

Os valores sobre as barras, entre parênteses, representam o número de indivíduos qualificados como mortos. “n.s” indicam diferenças não significativas e “*” diferenças significativas a 5% de significância.

A mortalidade observada durante o período de estudo em função do nível de infestação por cipós variou de 2,6% para as árvores com presença de cipós na copa e

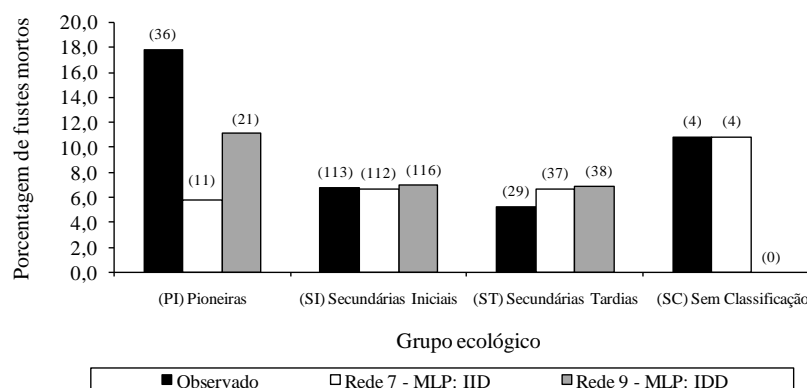
fuste, a 8,3% para árvores sem a presença de cipós, enquanto para a variável iluminação de copa, a mortalidade variou de 3,9 a 16,5%, para as classes de iluminação parcial e total da copa, respectivamente. Para estas duas variáveis, as estimativas das redes 7 e 9 foram estatisticamente iguais aos valores observados, o que não ocorreu para a variável nível de iluminação da copa. Nesta, as taxas de mortalidade variaram entre 4,4 e 11,1%, valores que correspondem às classes de qualidade regular e ruim, respectivamente.

O comportamento observado de mortalidade em relação às variáveis de infestação por cipós e iluminação de copa não era esperado, visto que indivíduos com maiores níveis de infestação por cipós (maior competição) e menos iluminados deveriam apresentar maiores taxas de mortalidade (PHILLIPS et al., 2005; REGO e POSSAMAI, 2006).

Mesmo assim, torna-se importante a precisa estimativa da mortalidade em função dessas variáveis qualitativas, visto que tais variáveis podem influenciar significativamente as taxas de crescimento das árvores remanescentes. Vários estudos que verificaram a influência dessas variáveis no desenvolvimento das árvores observaram influência significativa nas taxas de crescimento em função do nível de infestação por cipós (WHIGHAM, 1984; GRAUEL e PUTZ, 2004; SCHNITZER et al., 2005; CAMPANELLO et al., 2007), bem como respondendo a diferentes quantidades e qualidades de luz (DENSLOW et al., 1990; KING, 1991; POPMA e BONGERS, 1991; REGO e POSSAMAI, 2006).

Em relação à qualidade das copas, foi observada tendência coerente para a mortalidade das árvores, onde árvores com qualidade de copa ruim apresentaram maiores taxas de mortalidade (11,1%). Uma copa mal formada acarreta redução da área fotossinteticamente ativa da árvore e pode interferir no crescimento devido à realocação de energia direcionada à produção de novos galhos e ao refohamento. A ocorrência deste estresse em alta intensidade incorre no aumento da probabilidade de morte da árvore (FREITAS e BERTI FILHO, 1994).

As previsões de mortalidade em função do grupo ecológico (Figura 4) indicam que as taxas de mortalidade variaram de 5,2 a 17,7%, para os indivíduos dos grupos das secundárias tardias e pioneiras, respectivamente. As estimativas das redes 7 e 9 foram estatisticamente iguais aos valores observados.



Teste K-S a 5% de significância - Rede 7: 0,136^{n.s.}; Rede 9: 0,078^{n.s.}

Figura 4 – Porcentagem de indivíduos mortos observados e estimados pelas redes 7 e 9 para os dados de generalização, em relação ao grupo ecológico, em um período de 14 anos.

Os valores sobre as barras, entre parênteses, representam o número de indivíduos qualificados como mortos. “n.s” indicam diferenças não significativas a 5% de significância.

O comportamento observado está de acordo com a tendência esperada. Taxas mais altas de mortalidade estão associadas às espécies que tendem a ter maior necessidade de luz (pioneiras) (ALDER e SILVA, 2000; KÖHLER et al., 2001). Por outro lado, as espécies secundárias tardias, que são mais adaptadas às variações ambientais, tendem a apresentar menores taxas de mortalidade.

As distribuições diamétricas das árvores vivas e das árvores mortas são apresentadas na Figura 5. As estimativas de mortalidade obtidas pelas redes 7 e 9 não afetaram as distribuições de diâmetro e de altura das árvores remanescentes (vivas) (Figura 5a e 5c). Observa-se também que as estimativas de mortalidade das árvores foram precisas em relação à classe de diâmetro e de altura (Figura 5b e 5d).

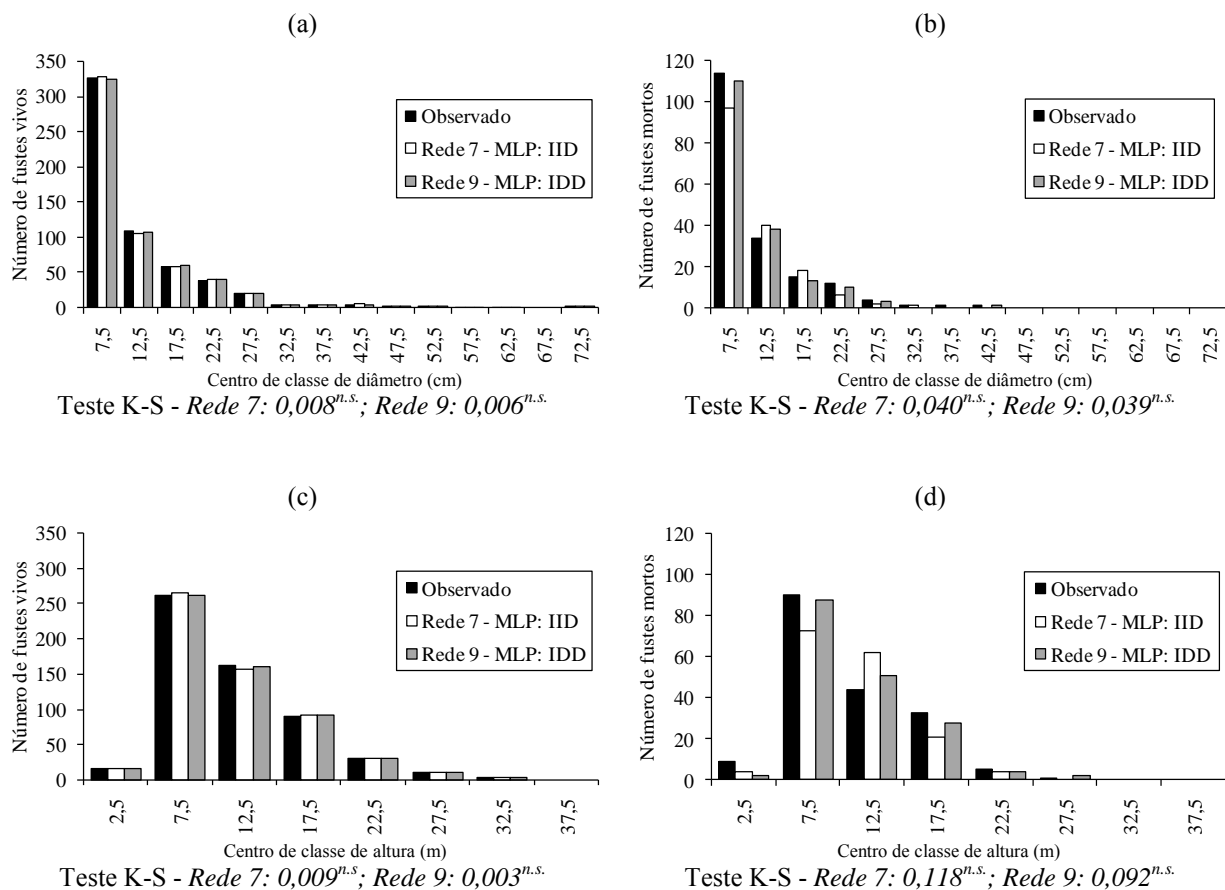
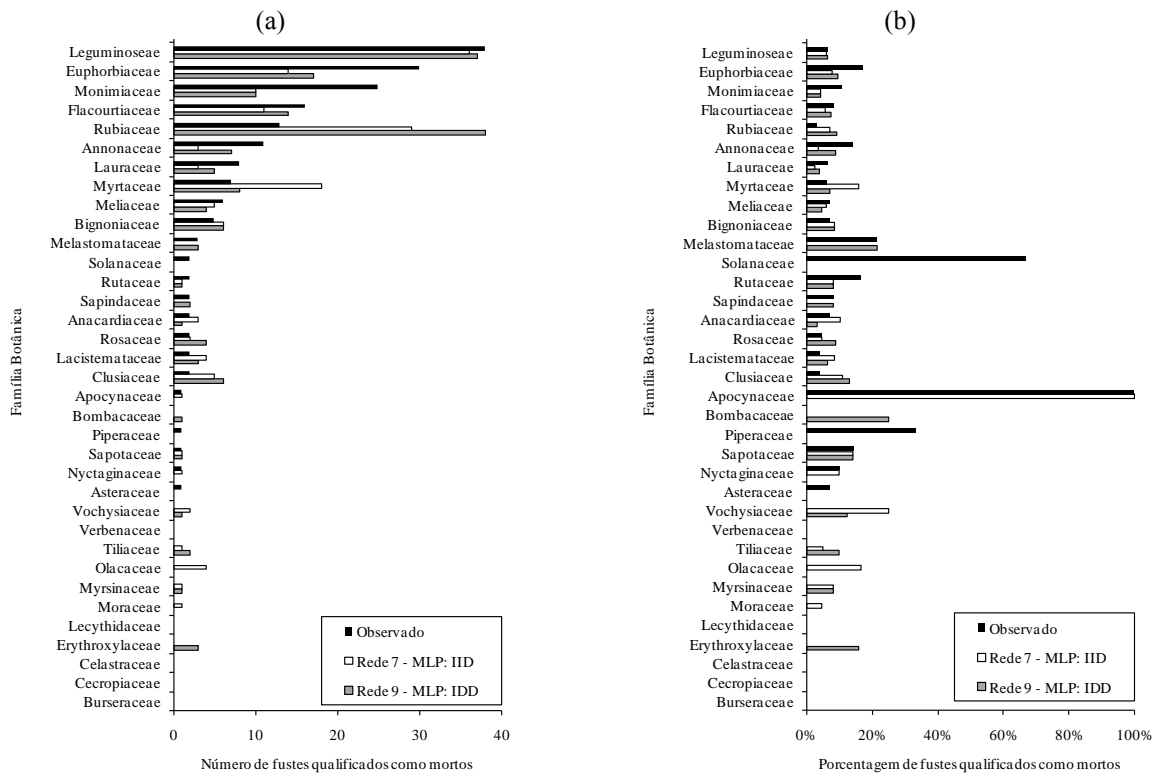


Figura 5 - Número de indivíduos vivos e mortos, observados e estimados pelas redes 7 e 9 para os dados de generalização no ano de 2008.

“n.s” indicam diferenças não significativas a 5% de significância.

Pulz (1998), ao analisar um fragmento de Floresta Semidecidual Montana no Estado de Minas Gerais, verificou que a mortalidade concentrou-se nas menores árvores e nas espécies exigentes de luz. Em florestas da Austrália, Monserud e Sterba (1999) também constataram que maiores taxas de mortalidade ocorreram em árvores de pequeno porte, com grande redução dessas taxas em função do aumento do porte das árvores.

A frequência de indivíduos qualificados como mortos pelas redes 7 e 9 no último ano de medição (2008) foi estatisticamente igual à distribuição observada em relação às famílias botânicas presentes no grupo de generalização (Figura 6a). Foi observada maior frequência de indivíduos mortos nas famílias Leguminosae (38), Euphorbiaceae (30) e Monimiaceae (25). Maiores porcentagens de mortalidade nas Famílias Apocynaceae (100%) representada por apenas um indivíduo; Solanaceae (67%) e Piperaceae (33%), ambas com apenas dois indivíduos (Figura 6b).



Teste K-S - Rede 7: 0,110^{n.s.}; Rede 9: 0,099^{n.s.}

Teste K-S - Rede 7: 0,121^{n.s.}; Rede 9: 0,102^{n.s.}

Figura 6 – Frequência de mortalidade (a) e porcentagem de mortalidade (b) observada e estimada pelas redes 7 e 9 para os dados de generalização em relação às famílias botânicas no ano de 2008.

“n.s” indicam diferenças não significativas a 5% de significância.

A dificuldade para estimar mortalidade em florestas inequiâneas é devido a existencia de fatores abióticos e bióticos pouco compreendidos, bem como a limitação nas bases de dados utilizadas (ROSSI et al., 2007). No entanto, no presente estudo foram obtidas estimativas precisas de mortalidade, com alto grau de detalhamento, para uma floresta com grande diversidade de espécies e porte de árvores.

Pelos resultados apresentados, pôde-se observar que as redes neurais artificiais foram adequadas para estimar a probabilidade de mortalidade de árvores individuais. A rede 9 resultou nas estimativas mais precisas de mortalidade. A função de ativação exponencial, utilizada nos neurônios das camadas intermediária e de saída da rede 9 (MLP: 60-14-1), utilizando o índices de competição dependente da distância, foi a melhor alternativa para estimar probabilidade de mortalidade.

4. CONCLUSÕES

Com este estudo pode-se concluir que:

- Redes neurais artificiais podem ser utilizadas com eficiência para estimar a mortalidade de árvores individuais em florestas inequiâneas.
- O emprego de redes para aproximação de funções (estimativa da probabilidade de mortalidade) juntamente com a aplicação da regra de mortalidade proposta por Pretzsch et al., (2002) é indicada para predição da mortalidade em Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDER, D.; SILVA, J.N.M. An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v.130, n.1-3, p.141-157, 2000.

BARRETO, J.M. **Introdução às redes neurais artificiais**. Florianópolis: UFSC, 57 p., 2002.

BINOTI, M.L.M.S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T.B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC, 262 p. 2000.

CAMPANELLO, P.I.; GARIBALDI, J.F.; GATTI, M.G.; GOLDSTEIN, G. Lianas in a subtropical Atlantic Forest: Host preference and tree growth. **Forest Ecology and Management**, v.242, p.250-259, 2007.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3.ed. Viçosa-MG: UFV, 2009. 548 p.

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

CORAIOLA, M. **Dinâmica de uma Floresta Estacional Semidecidual - MG: abordagem com processos de amostragem em múltiplas ocasiões**. 168 f. 2003. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

CRESCENTE-CAMPO, F.; MARSHALL, P.; SOALLEIRO, R.R. Modeling noncatastrophic individual tree mortality for *Pinus radiata* plantations in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v.257, n.4, p.1542-1550, 2009.

DENSLOW, J.S.; SCHULTZ, J.C.; VITOUSEK, P.M.; STRAIN, B.R. Growth responses of tropical shrubs to treefall gap environments. **Ecology**, v.71, p.165-179, 1990.

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

FINEGAN, B.; CAMACHO, M. Stand dynamics in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest, 1988-1996. **Forest Ecology and Management**, v.121, n.3, p.177-189, 1999.

FLEWELLING, J.W., MONSERUD, R.A. **Comparing methods for modelling tree mortality**. In: USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-25. p.168-177, 2002.

FREITAS, S.; BERTI FILHO, E. Efeito do desfolhamento no crescimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (Myrtaceae). **IPEF**, v.47, p. 36-43, 1994.

GANDOLFI, S.; LEITÃO FILHO, H.F.; BEZERRA, C.L. Levantamento florístico e caráter sucessional de espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta Mesófila Semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Revista Brasileira de Biologia**, v.55, n.4, p.753-767, 1995.

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

GRAUEL, W.T.; PUTZ, F.E. Effects of lianas on growth and regeneration of *Prioria copaifera* in Darien, Panama. **Forest Ecology and Management**, v.190, p.99-108, 2004.

GROOM, J.D.; HANN, D.W.; TEMESGEN, H. Evaluation of mixed-effects models for predicting Douglas-fir mortality. **Forest Ecology and Management**, v.276, p.139-145, 2012.

GUAN, B.T.; GERTNER, G.Z. Modeling red pine tree survival with an artificial neural network. **Forest Science**, v.37, p.1429-1440, 1991.

HAMILTON Jr., D.A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of northern Idaho. **Forest Science**, v.32, p.989-1000, 1986.

HAMILTON Jr., D.A. Extending the range of applicability of an individual tree mortality model. **Canadian Journal of Forest Research**, v.20, n.8, p.1212-1218, 1990.

HAMILTON Jr., D.A.; EDWARDS, B.M. **Modeling the probability of individual tree mortality**. Ogden: Forest Service / Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1976. 22 p. (Research Paper, n. 185).

HASENAUER, H.; MERKL, D. **Forest tree mortality simulation in uneven-aged stands using connectionist networks**. In: Neural Networks in Engineering Proc. Int. Conf. on Engineering Applications of Neural Networks, Stockholm, Sweden, 1997.

HASENAUER, H.; MERKL, D.; WEINGARTNER, M. Estimating tree mortality of Norway spruce stands with neural networks. **Advances in Environmental Research**, v.5, p.405-414, 2001.

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

HURST, J.M.; STEWART, G.H.; PERRY, G.L.W.; WISER, S.K.; NORTON, D.A. Determinants of tree mortality in mixed old-growth *Nothofagus* forest. **Forest Ecology and Management**, v.270, p.189-199, 2012.

JAIN, A.K.; MAO, J.; MOHIUDDIN, K.M. Artificial Neural Networks: A Tutorial. **Computer**, v.29, n.3, p.31-44, 1996.

KING, D.A. Correlations between biomass allocation, relative growth rate and light environment in tropical forest saplings. **Functional Ecology**, v.5, p.485-492, 1991.

KÖHLER, P.; DITZER, T.; ONG, R.C.; HUTH, A. Comparison of measured and modelled growth on permanent plots in Sabahs rain forests. **Forest Ecology and Management**, v.144, n.1-3, p.101-111, 2001.

LEE, Y.J. Predicting mortality for even-aged stands of lodgepole pine. **The Forestry Chronicle**, v.47, n.1, p.29-32, 1971.

LEITE, H.G.; SILVA, M.L.M.; BINOTI, D.H.B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F.H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v.130, p.263-269, 2010.

LIPPNANN, R. An introduction to computing with neural nets. **ASSP Magazine**, v.4, n.2, p.4-22, 1987.

MARTINS, F.B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucalipto**. 2011. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MEIRA NETO, J.A.A.; MARTINS, F.R. Estrutura da Mata da Silvicultura, uma Floresta Estacional Semidecidual Montana no município de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v.24, n.2, p.151-160, 2000.

MONSERUD, R.A. Simulation of forest tree mortality. **Forest Science**, v.22, n.4, p.438-444, 1976.

MONSERUD, R.A.; STERBA, H. Modeling individual tree mortality for Australian forest species. **Forest ecology and Management**, v.113, n.2, p.109-123, 1999.

PHILLIPS, O.L.; VÁSQUEZ MARTÍNEZ, R.; MONTEAGUDO MENDOZA, A.; BAKER, T.R.; NÚÑEZ VARGAS, P. Large lianas as hyperdynamic elements of the tropical forest canopy. **Ecology**, v.86, p.1250-1258, 2005.

POPMA, J.; BONGERS, F. Acclimation of seedlings of three Mexican tropical rain forest tree species to a change in light availability. **Journal of Tropical Ecology**, v.7, p.85-97, 1991.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKÝ, J. The single tree-based stand simulator Silva: construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**, v.162, n.1, p.3-21, 2002.

PULZ, F.A. **Estudo da dinâmica e a modelagem da estrutura diamétrica de uma floresta semidecídua montana na região de Lavras - MG**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

REGO, G.M.; POSSAMAI, E. Efeito do sombreamento sobre o teor de clorofila e crescimento inicial do jequitibá rosa. **Boletim de Pesquisa Florestal de Colombo**, n.53, p.179-194, 2006.

ROSSI, L.M.B.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Revista Floresta**, v.37, n.2, p.275-291, 2007.

SCHNITZER, S.A.; KUZEE, M.E.; BONGERS, F. Disentangling above- and below-ground competition between lianas and trees in a tropical forest. **Journal of Ecology**, v.93, p.1115-1125, 2005.

SILVA, J.N.M.; LOPES, J.C.A. **Inventário florestal contínuo em florestas tropicais: a metodologia utilizada pela Embrapa-Cpatu na Amazônia brasileira**. Belém- PA: Embrapa-CPATU, 1984, 36 p. (Documentos 36).

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry: The principles and practice of statistics in biological research**. San Francisco: Freeman and Company. 1969. 776 p.

STAEBLER, G.R. **Mortality estimation in fully stocked stands of young-growth Douglas-fir**. U.S. Forest Service, Research Paper 4, 8 p., 1953.

STATSOFT, INC. **Statistica (data analysis software system)**, version 10.0. 2012.

TOMÉ, M. Os modelos de produção florestal na gestão de povoamentos florestais. **Revista Agros**, v.8, n.2, p.32-36, 1991.

VANCLAY, J.K. **Modeling forest growth and yield: applications to mixed tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312 p.

WHIGHAM, D.F. The influence of vines on the growth of *Liquidambar styraciflua* L. (Sweetgum). **Canadian Journal of Forest Research**, v.14, p.37-39, 1984.

YANG, Y.; TITUS, S.J.; HUANG, S. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. **Ecological Modelling**, v.163, n.3, p.209-222, 2003.

YAO, X., TITUS, S.J., MACDONALD, S.E. A generalized logistic model of individual tree mortality for aspen, white spruce, and lodgepole pine in Alberta mixed wood forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v.31, p.283-291, 2001.

ZHAO, D.; BORDERS, B.; WILSON, M.; RATHBUN, S.L. Modeling neighborhood effects on the growth and survival of individual trees in a natural temperate species rich forest. **Ecological Modelling**, v.196, n.1, p.90-102, 2006.

CAPÍTULO III

PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA DE ÁRVORES EM UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL POR MEIO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

RESUMO – Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de redes neurais artificiais para projetar o diâmetro (*dap*), altura total (*Ht*) e altura do fuste (*Hf*) de árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão. Foram utilizados dados de dez parcelas permanentes, monitoradas durante de 14 anos, em cinco ocasiões, localizadas no município de Viçosa, Minas Gerais. O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois grupos: grupo de treinamento, composto por seis parcelas, totalizando nas cinco medições, 3.556 casos, e o grupo de generalização, composto por quatro parcelas, as quais foram utilizadas para avaliar o poder de generalização das redes após o treinamento, totalizando 2.062 casos. Redes neurais foram treinadas e aplicadas para projetar simultaneamente o *dap*, *Ht* e *Hf*, utilizando diferentes arquiteturas, modelos de redes (MLP e RBF) e funções de ativação. As variáveis de entrada foram os diâmetros e alturas das árvores observadas numa ocasião presente, índices de competição, nível de iluminação das copas, qualidade da copa, grupo ecológico e família botânica. Foram obtidas redes com alto poder generalista para as três variáveis de saída simultaneamente (*dap*, *Ht* e *Hf*). Os resultados encontrados confirmam o potencial de utilização de redes neurais para a projeção do crescimento de árvores em Floresta Estacional Semidecidual Montana.

Palavras-Chave: Floresta Natural Semidecidual Montana, floresta inequiânea, crescimento de árvore individual.

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas tem sido um interesse na mensuração florestal o desenvolvimento de modelos de crescimento e produção utilizando árvores individuais (BELLA, 1971; DANIELS, 1976; GLOVER e HOOL, 1979; HASENAUER e MONSERUD, 1996; EID e TUHUS, 2001; VOSPERNIK et al., 2010; MARTINS, 2011).

A modelagem do crescimento e produção de árvores individuais consiste em estabelecer diferentes sub-modelos para predizerem o crescimento em diâmetro, altura, ingresso e mortalidade (TOMÉ e BURKHART, 1989; HASENAUER et al., 1998; GONZÁLEZ et al., 2006).

Estudos têm sido realizados com o intuito de comparar as melhores funções para predição do crescimento das árvores (HASENAUER e MONSERUD, 1996; ANDREASSEN e TOMTER, 2003; GONZÁLEZ et al., 2006; VOSPERNIK et al., 2010; MARTINS, 2011). No entanto, existem duas dificuldades principais na definição dos modelos: 1) definir as variáveis explanatórias mais indicadas para serem utilizadas no modelo e 2) a inclusão de variáveis qualitativas nos modelos de regressão.

Nesse sentido, as redes neurais artificiais (RNA) podem ser utilizadas como alternativa ao procedimento tradicional de modelagem em nível de árvore individual (GUAN e GERTNER, 1991). As redes são aplicadas em problemas de classificação de dados, análise de séries temporais e reconhecimento de padrões (JAIN et al., 1996; HAYKIN, 2001; BARRETO, 2002).

Grande número de autores discutiu estrutura, técnica e operação das RNA (JAIN et al., 1996; WEINGARTNER et al., 2000; BARRETO, 2002; BRAGA et al., 2000). Durante os últimos anos houve maior interesse em utilizar as RNA na ciência

florestal (DIAMANTOPOULOU, 2005; MIEHLE et al., 2009; ÖZÇELIK et al., 2010; CUNHA, 2010) e na estimativa do crescimento e produção de árvores individuais.

Dentre os principais trabalhos sobre crescimento em nível de árvore individual por meio de RNA destacam-se os trabalhos de Porras (2007) que projetou o diâmetro e a altura de *Pinus cooperi* em uma floresta no México, e Binoti (2010) e Castro (2011) que projetaram o diâmetro e a altura de árvores individuais de *Eucalyptus* spp. no Brasil. O uso de redes neurais em florestas tropicais para modelagem em nível de árvore individual ainda não foram reportados.

Diante desta lacuna, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de redes neurais para projetar o diâmetro e altura de árvores em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão, no município de Viçosa, MG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos no município de Viçosa, Minas Gerais, em um fragmento florestal pertencente à Universidade Federal de Viçosa, que possui 17 ha de área (42°52'W e 42° 50'W de longitude e 20° 44'S e 20° 47'S de latitude), pertencente à região fitoecológica de Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão.

Para o presente trabalho, foi amostrado um hectare, dividido em dez parcelas retangulares, não contínuas, de 1.000 m² cada (20m x 50m) (MEIRA NETO e MARTINS, 2000). Em cada parcela, foram identificadas as árvores e mensurados os diâmetros a 1,3 m de altura (*dap*), as alturas total (*Ht*) e do fuste (*Hf*) de todas as árvores com *dap* ≥ 5 cm. Para cada árvore foram determinadas as coordenadas x e y em relação à origem da sua parcela, para criação de um mapa de localização dos indivíduos e estimação dos índices de competição. Os inventários foram realizados nos anos 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008.

Os indivíduos mensurados foram classificados em relação aos níveis de infestação por cipós, iluminação de copa e qualidade de copa, conforme proposto por Silva e Lopes (1984), além de serem classificados em grupos ecológicos (GANDOLFI et al., 1995) (Tabela 1). Para o entendimento do possível efeito dessas variáveis nas taxas de crescimento das árvores, foram elaborados gráficos de barras para as taxas anuais de crescimento em *dap*, *Ht* e *Hf* em função de cada uma dessas variáveis.

Tabela 1– Critérios para classificação dos indivíduos em relação à infestação por cipós, iluminação de copa, qualidade da copa e grupo ecológico

Critérios para classificação	Classe
<i>Infestação por Cipós</i>	
Sem presença de cipós	1
Presença de cipós somente no fuste	2
Presença de cipós somente na copa	3
Presença de cipós no fuste e na copa	4
<i>Iluminação de copa</i>	
Copa recebendo radiação solar direta na sua parte superior e lateral	1
Copa recebendo radiação solar direta na sua parte superior	2
Ausência de radiação solar direta na copa	3
<i>Qualidade da copa</i>	
Boa: copa normal, sem presença de danos	1
Regular: copa com algum dano de pequena escala	2
Inferior: copa com severos danos, com poucos galhos e folhas	3
<i>Grupo Ecológico</i>	
Espécies dependentes de luz e que não ocorrem no sub- bosque, se desenvolvendo em clareiras ou bordas da floresta	Pioneiras (PI)
Desenvolvem-se em condições de sombreamento médio, como pequenas clareiras e sub-bosque não densamente sombreado	Secundárias iniciais (SI)
Desenvolvem-se no sub-bosque em condições de sombra leve ou densa, podendo crescer até alcançar o dossel	Secundárias tardias (ST)
Espécies que em função da carência de informações não foram incluídas em nenhuma das categorias	Sem classificação (SC)

As principais características quantitativas do povoamento estudado são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Sumário dos dados do inventário no fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizado em Viçosa - Minas Gerais

Variável	Ano de medição				
	1994	1997	2000	2004	2008
<i>dap</i> mínimo (cm)	5,1	5,1	5,1	5,1	5,0
<i>dap</i> médio (cm)	11,6	11,8	12,0	12,0	12,2
<i>dap</i> máximo (cm)	80,2	82,1	84,0	85,6	91,0
<i>q</i> (cm)	14,2	14,6	14,9	15,0	15,3
<i>Ht</i> mínima (m)	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4
<i>Ht</i> média (m)	10,4	11,1	11,4	12,4	12,5
<i>Ht</i> máxima (m)	32,1	32,4	33,0	39,2	39,4
<i>Hf</i> mínima (m)	1,0	1,3	1,3	1,4	1,4
<i>Hf</i> média (m)	7,0	7,3	7,5	7,5	7,9
<i>Hf</i> máxima (m)	18,7	24,0	24,0	24,0	24,0
Área basal (m ² ha ⁻¹)	24,1	25,9	26,2	26,2	27,5
Volume (m ³ ha ⁻¹)	235,5	275,2	291,4	323,9	342,1
Famílias botânicas	43	43	43	42	42
Gêneros botânicos	100	98	99	99	103
Espécies identificadas	136	135	137	135	148
Espécies não identificadas	4	3	4	3	5
Número de fustes (ha)	1521	1540	1497	1474	1492
Densidade (árvores ha ⁻¹)	1379	1383	1331	1307	1326
Índice de Shannon-Weaver (H')	4,07	4,02	4,00	3,96	4,02
Número de indivíduos ingressos (ha)*	-	114	79	57	134
Número de indivíduos mortos (ha)*	-	95	122	80	115

* Refere-se ao número de indivíduos ingressos / mortos desde a medição imediatamente anterior.

O conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois grupos, com restrições de representatividade da variabilidade dos dados em cada grupo. O primeiro refere-se aos dados para treinamento de redes neurais artificiais para a projeção do *dap*, *Ht* e *Hf*, composto por seis parcelas, totalizando 3.556 casos nas cinco medições. O segundo refere-se aos dados para generalização das redes, composto por quatro parcelas, o que correspondeu a 2.062 casos.

A generalização consiste na capacidade de uma rede neural produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes durante o treinamento, ou seja, na aprendizagem.

2.2. Índices de competição para a projeção do *dap*, altura total e altura do fuste

Para cada fuste (unidade básica do estudo), em cada medição, foram calculados dois índices de competição semi-independentes da distância (ISD),

selecionados em estudos preliminares para a estimativa do crescimento em diâmetro (ISD_d) e crescimento em altura (ISD_h). A seguir é apresentada a relação funcional dos índices de competição selecionados:

$$ISD_d = \frac{Ht_i}{Ht_n} \quad (1)$$

$$ISD_h = \frac{AS_i^2}{ASq^2} \quad (2)$$

em que: Ht_i = altura total do fuste da árvore-objeto (m); \overline{Ht}_n = altura média dos fustes de n árvores próximas da árvore-objeto (m), limitadas a um raio de competição de seis metros; AS_i = área seccional do fuste da árvore-objeto, medido a 1,30 m (m^2), ASq = área seccional correspondente ao diâmetro médio (q) dos fustes das árvores vizinhas (m^2).

2.3. *Treinamento das redes neurais artificiais para projeção do dap, altura total e altura do fuste*

Na construção e treinamento das redes neurais, utilizou-se o *software* Statística 10.0 (STATSOFT, INC, 2012), sendo testadas diferentes arquiteturas de redes MLP (*Multilayer Perceptron*) e RBF (*Radial Basis Function*).

Para as redes MLP, foram avaliadas combinações de quatro diferentes funções de ativação nas camadas intermediária e de saída (identidade, logística, tangencial e exponencial). Para as redes RBF, os neurônios da camada de saída foram sempre lineares (função identidade) e os neurônios da camada intermediária, função de base radial (gaussiana) como função de ativação.

As redes foram treinadas para projetar o diâmetro (dap), a altura total (Ht) e a altura do fuste (Hf) como variáveis de saída, simultaneamente. Pela aplicação desta técnica, deseja-se a aproximação de uma função desconhecida $f(x)$, que descreva o mapeamento dos pares de entrada(x)-saída(y) de um conjunto de n padrões de treinamento (HAYKIN, 2001; BINOTI, 2010).

Os treinamentos foram do tipo *feedforward*, pelo método supervisionado, e as variáveis de entrada foram selecionadas na possível relação com as variáveis de saída analisadas. Foram treinadas um total de 800 redes, conforme especificado na Tabela 3. A variável “nome científico” (espécie) não foi utilizada como variável de entrada, para que as redes adquirissem maior poder generalista, ou seja, não seriam eficientes para projetarem o crescimento apenas daquelas espécies presentes no treinamento.

Tabela 3 – Variáveis utilizadas no treinamento das RNA para projeção do *dap*, altura total (*Ht*) e altura do fuste (*Hf*) de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais

Número da Rede	Tipo	Saídas	Entradas Numéricas	Entradas Categóricas
1 a 400	MLP	<i>dap</i> ₂ , <i>Ht</i> ₂ , <i>Hf</i> ₂	<i>A</i> ₁ , <i>A</i> ₂ , <i>dap</i> ₁ , <i>Ht</i> ₁ , <i>Hf</i> ₁ , <i>ISD</i> _d , <i>ISD</i> _h	F, GE, C, IC, QC
401 a 800	RBF	<i>dap</i> ₂ , <i>Ht</i> ₂ , <i>Hf</i> ₂	<i>A</i> ₁ , <i>A</i> ₂ , <i>dap</i> ₁ , <i>Ht</i> ₁ , <i>Hf</i> ₁ , <i>ISD</i> _d , <i>ISD</i> _h	F, GE, C, IC, QC

em que MLP são redes *Multilayer Perceptron* e RBF, redes *Radial Basis Function*; *dap*₁ e *dap*₂ são os diâmetros a 1,3 m (cm) atual e futuro, respectivamente; *Ht*₁ e *Ht*₂ são as alturas total (m) atual e futura, respectivamente; *Hf*₁ e *Hf*₂ são as alturas dos fustes (m) atual e futura, respectivamente; *A*₁ e *A*₂ são os anos de medição atuais e futuros, respectivamente; *ISD*_d e *ISD*_h são índices de competição semi-dependentes da distância; F é a família botânica do indivíduo; GE é o grupo ecológico; C é o nível de infestação por cipó; IC é o nível de iluminação da copa e QC é o nível de qualidade da copa.

2.4. Avaliação das redes neurais artificiais para projeção do *dap*, altura total e altura do fuste

Após os treinamentos, foram selecionadas as cinco melhores redes dos tipos MLP e cinco RBF, com base no coeficiente de correlação ($r_{\hat{y}y}$) entre os valores observados e estimados de diâmetro, altura total e do fuste e na raiz do erro quadrado médio (RMSE). Quanto maior o coeficiente de correlação (próximo a 1) e menor RMSE, melhor a previsão da estimativa.

$$r_{\hat{y}y} = \frac{\text{cov}(Y, \hat{Y})}{\sqrt{S^2(Y)S^2(\hat{Y})}} \quad (3)$$

$$\text{RMSE}(\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} / \bar{Y} \quad (4)$$

em que: Y_i é a variável de saída observada; \hat{Y}_i é a variável de saída estimada; cov é a covariância; S^2 é a variância; n é o número total de dados; \bar{Y} é a média da saída observada.

Em seguida, para avaliar o poder de generalização das redes selecionadas, foram utilizados os dados das parcelas independentes que não estavam presentes durante o treinamento. As projeções foram realizadas para a medição imediatamente posterior, ou seja, de 1994 para 1997; de 1997 para 2000; de 2000 para 2004 e de 2004 para 2008. A aplicação das redes treinadas aos dados de generalização foi feita pelo *software* Statistica 10.0.

Também foram calculados os valores de $r_{\hat{y}y}$ e RMSE para os dados de generalização. Além disso, foram elaborados gráficos de dispersão entre os valores

observados e estimados para cada rede para as variáveis de crescimento, tanto para os dados de treinamento quanto de generalização, bem como histogramas de erros percentuais. Os erros percentuais foram calculados de acordo com a equação 5.

$$\text{Erro}(\%) = \frac{\hat{Y} - Y}{Y} \cdot 100 \quad (5)$$

em que: Y é a variável de saída observada; \hat{Y} é a variável de saída estimada pela rede.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 1, o grupo ecológico das pioneiras apresentou maiores taxas de crescimento para as três variáveis analisadas. Maiores taxas de crescimento foram verificadas para as árvores com nenhuma infestação por cipós ou apenas cipó no tronco para *dap* e *Ht*. Entretanto, a presença de cipós não influenciou as taxas de crescimento em *Hf*. O nível de iluminação das copas e a qualidade das copas foram os fatores que mais influenciaram as taxas de crescimento das variáveis, principalmente em *dap* e *Ht*. Árvores com iluminação total das copas e com boa qualidade das copas foram as que mais cresceram.

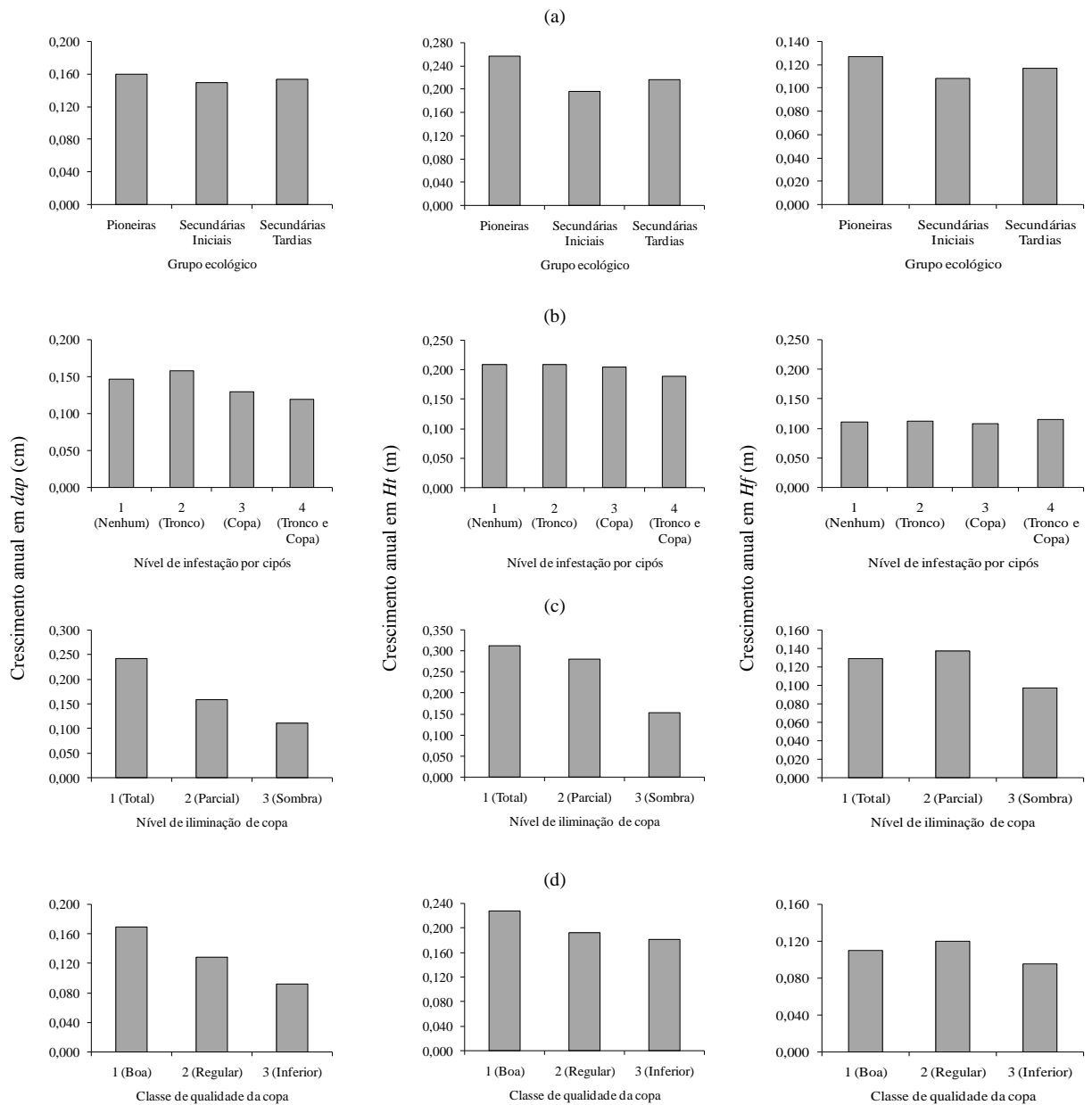


Figura 1 – Efeito das variáveis qualitativas: grupo ecológico (a), nível de infestação por cipós (b), iluminação de copas (c) e qualidade da copa (d) no crescimento anual de dap , altura total (H_t) e altura do fuste (H_f) de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão ecológica.

O uso de metodologias que associam variáveis qualitativas na análise de crescimento das árvores e dos povoamentos é uma prática já utilizada em países com tradição no manejo florestal (SILVA, 2007), entretanto, não são utilizados em modelos de crescimento e produção no Brasil. A agregação dessas informações qualitativas podem aumentar o entendimento sobre o crescimento das florestas. Assim, se torna fundamental o levantamento dessas variáveis qualitativas durante os

inventários florestais, para subsidiar os estudos de ecologia e modelagem das florestas.

Todas as redes selecionadas no treinamento para projeção do diâmetro, altura total e altura do fuste, simultaneamente, apresentaram correlações maiores que 0,90, que indica alta precisão entre as estimativas e os valores reais das variáveis analisadas (Tabela 4). Observou-se melhor poder de generalização das redes MLP, que apresentaram simultaneamente, maiores valores de $r_{\hat{y}y}$ e menores valores de RMSE para as três variáveis.

Para o *dap*, as redes MLP apresentaram coeficientes de correlação entre os valores observados e estimados ($r_{\hat{y}y}$) maiores que 0,990 no treinamento, e para as redes RBF, entre 0,960 e 0,980. Valores de RMSE inferiores a 9% foram observados para as redes MLP, enquanto que para as redes RBF eles foram superiores a 35%.

Todas as redes foram precisas para projeção do diâmetro das árvores individuais, indicando alta eficiência do método. Os valores de $r_{\hat{y}y}$ na generalização foram superiores a 0,970 para as redes MLP e para as redes RBF, entre 0,960 e 0,980. Em relação à RMSE, observou-se que as redes MLP apresentaram valores entre 8 e 23%, enquanto as redes RBF apresentaram valores superiores a 40%.

Para a variável *Ht*, as redes MLP apresentaram coeficientes de correlação maiores que 0,980 para o treinamento, e entre 0,940 e 0,970 para as redes RBF. Em relação à RMSE, observou-se que as redes MLP apresentaram valores inferiores a 10%, enquanto as redes RBF apresentaram valores superiores a 14%.

Ao avaliar o poder de generalização das redes selecionadas, observou-se que todas foram precisas para a projeção da altura total das árvores individuais, com valores de $r_{\hat{y}y}$ superiores a 0,850 para as redes MLP e 0,940 para as redes RBF.

Na análise da variável *Hf*, observou-se que as redes MLP apresentaram coeficientes de correlação entre os valores observados e estimados ($r_{\hat{y}y}$) maiores que 0,980 para os dados de treinamento, e entre 0,840 e 0,970 para as redes RBF. Em relação à RMSE, observou-se que as redes MLP apresentaram valores inferiores a 8%, enquanto as redes RBF apresentaram valores entre 14 e 62%.

Nas Figuras 2 a 7 podem ser observados os desvios por cada rede no treinamento e na generalização, para *dap*, *Ht* e *Hf*.

Tabela 4 – Resumo das redes neurais artificiais selecionadas para a projeção simultânea das variáveis *dap*, altura total (*Ht*) e altura do fuste (*Hf*) de árvores individuais em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais

Redes selecionadas	Arquitetura*	Função de ativação		<i>dap</i>				<i>Ht</i>				<i>Hf</i>			
				Treinamento		Generalização		Treinamento		Generalização		Treinamento		Generalização	
		Camada intermediária	Camada de saída	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	$r_{\hat{y}y}$	RMSE
1	MLP 61-138-3	Tangencial	Exponencial	0,9961	4,09	0,9858	23,22	0,9896	4,38	0,8729	70,68	0,9902	3,29	0,8547	60,71
2	MLP 61-49-3	Tangencial	Exponencial	0,9958	4,34	0,9737	46,48	0,9897	4,43	0,8526	80,43	0,9906	2,94	0,9293	68,22
3	MLP 61-186-3	Tangencial	Tangencial	0,9952	5,38	0,9948	8,58	0,9800	9,74	0,9716	15,72	0,9801	7,37	0,9626	16,05
4	MLP 61-51-3	Logística	Tangencial	0,9950	5,69	0,9936	10,44	0,9853	6,74	0,9182	45,69	0,9857	5,07	0,9388	25,97
5	MLP 61-126-3	Exponencial	Logística	0,9927	8,15	0,9895	17,41	0,9822	8,53	0,9624	20,70	0,9820	6,39	0,9562	18,78
6	RBF 58-79-3	Gaussiana	Identidade	0,9714	37,42	0,9686	50,84	0,9564	21,41	0,9537	25,48	0,9440	21,64	0,9378	27,37
7	RBF 12-81-3	Gaussiana	Identidade	0,9700	41,66	0,9736	43,10	0,9583	21,72	0,9597	22,24	0,9405	61,12	0,8438	66,08
8	RBF 58-76-3	Gaussiana	Identidade	0,9680	36,05	0,9714	46,60	0,9482	25,81	0,9486	28,27	0,9511	19,40	0,9439	24,48
9	RBF 58-86-3	Gaussiana	Identidade	0,9634	39,67	0,9711	48,41	0,9670	16,07	0,9638	20,15	0,9609	15,22	0,9539	20,77
10	RBF 58-81-3	Gaussiana	Identidade	0,9622	43,12	0,9687	50,99	0,9692	14,83	0,9686	17,47	0,9631	14,17	0,9554	19,29

em que MLP são redes *Multilayer Perceptron* e RBF, redes *Radial Basis Function*; (*) indica o número de neurônios da camada de entrada, intermediária e saída, respectivamente. As redes RBF 6, 8, 9 e 10 não utilizaram a variável de entrada QC. A rede 7 não utilizou as variáveis de entrada A_2 , F, C, IC e Hf_1 . As redes em formato “.xml” ou “.snn” podem ser obtidas por e-mail: <castrorvo@ymail.com>.

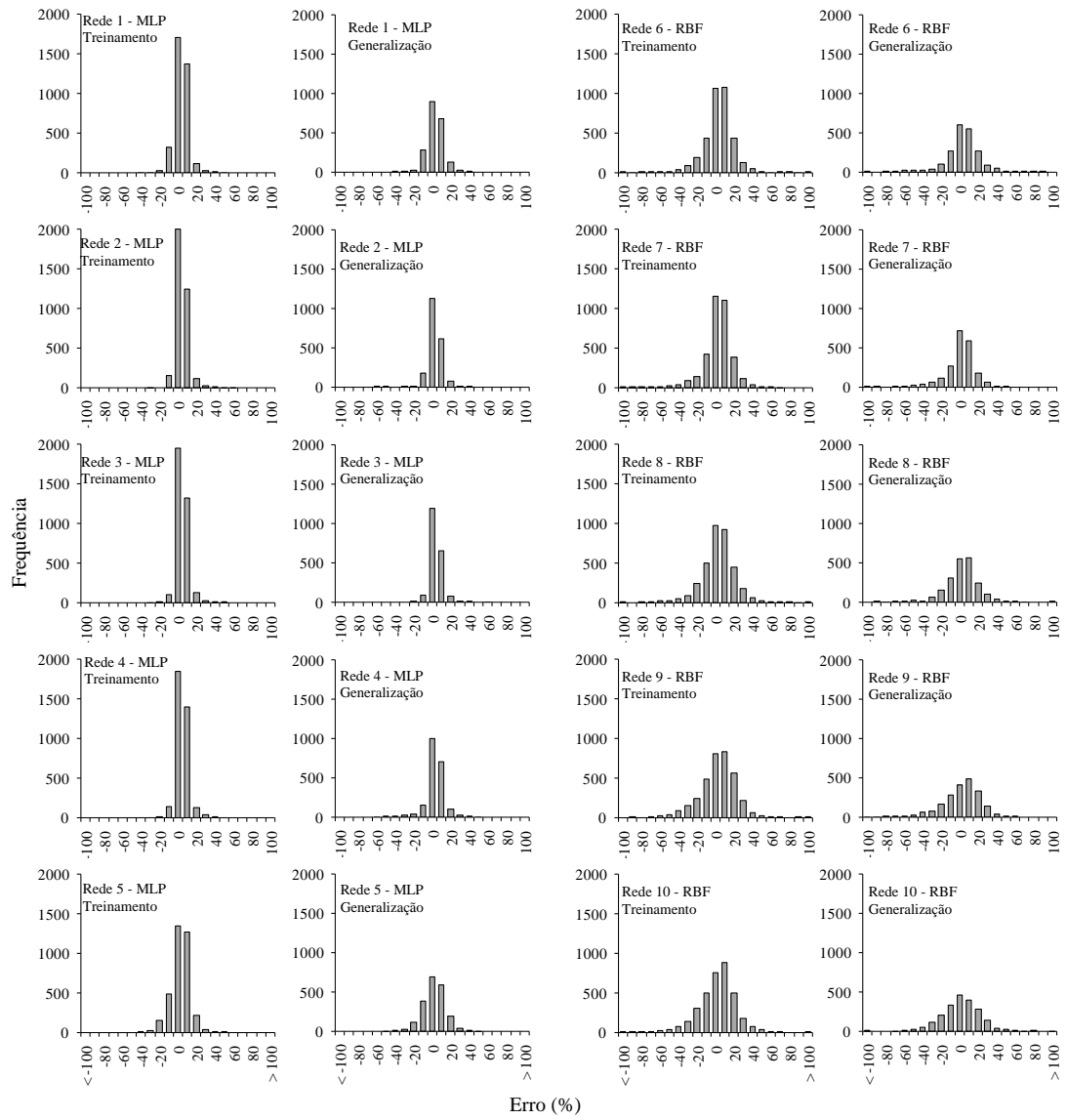


Figura 2 – Distribuição dos resíduos das estimativas do treinamento e da generalização das redes neurais artificiais para projeção da variável diâmetro (*dap*).

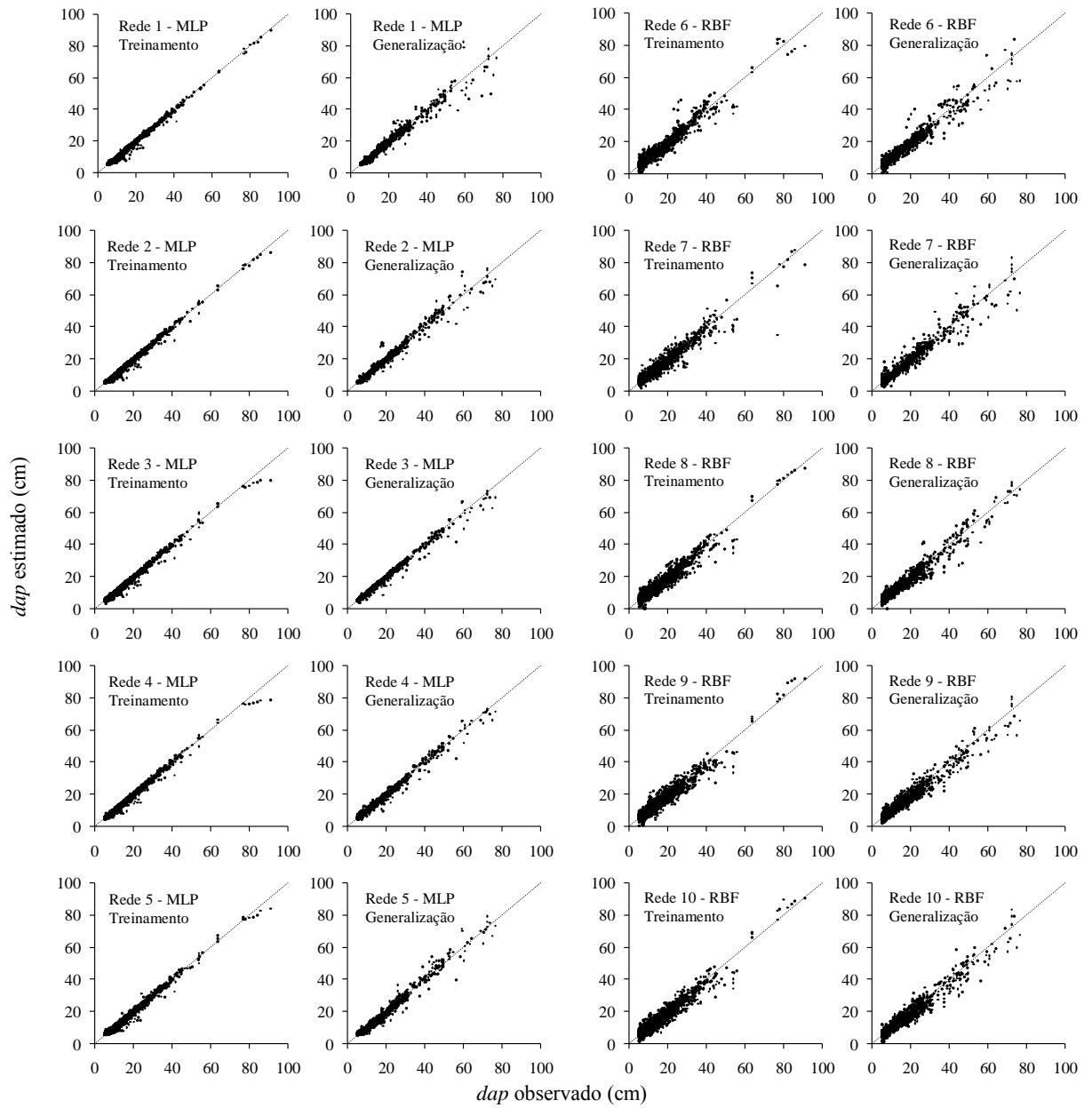


Figura 3 – Diâmetros a 1,3 m de altura (dap) observados e estimados por redes neurais artificiais para os dados de treinamento e generalização.

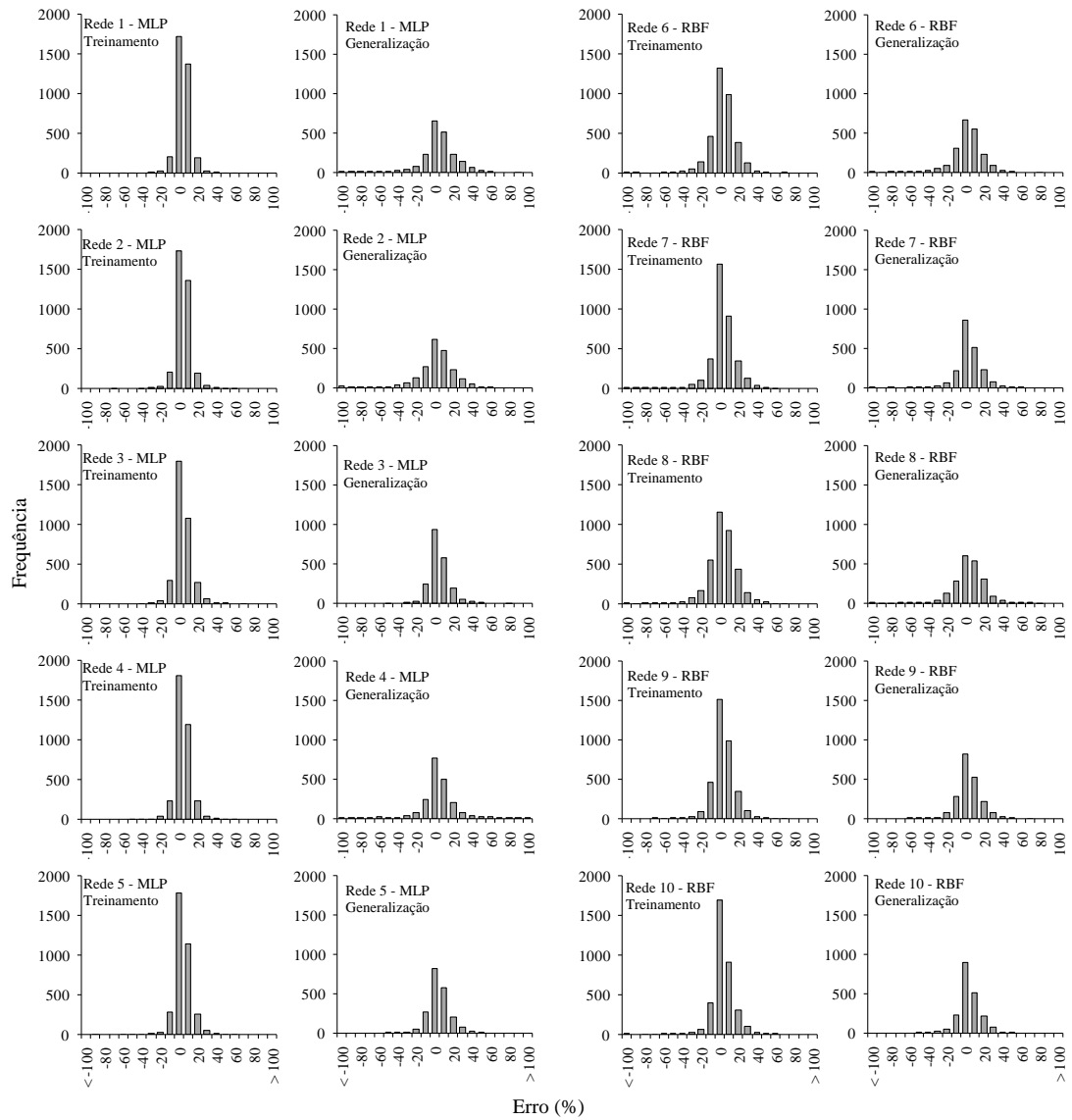


Figura 4 – Distribuição dos resíduos das estimativas do treinamento e da generalização das redes neurais artificiais para projeção da variável altura total.

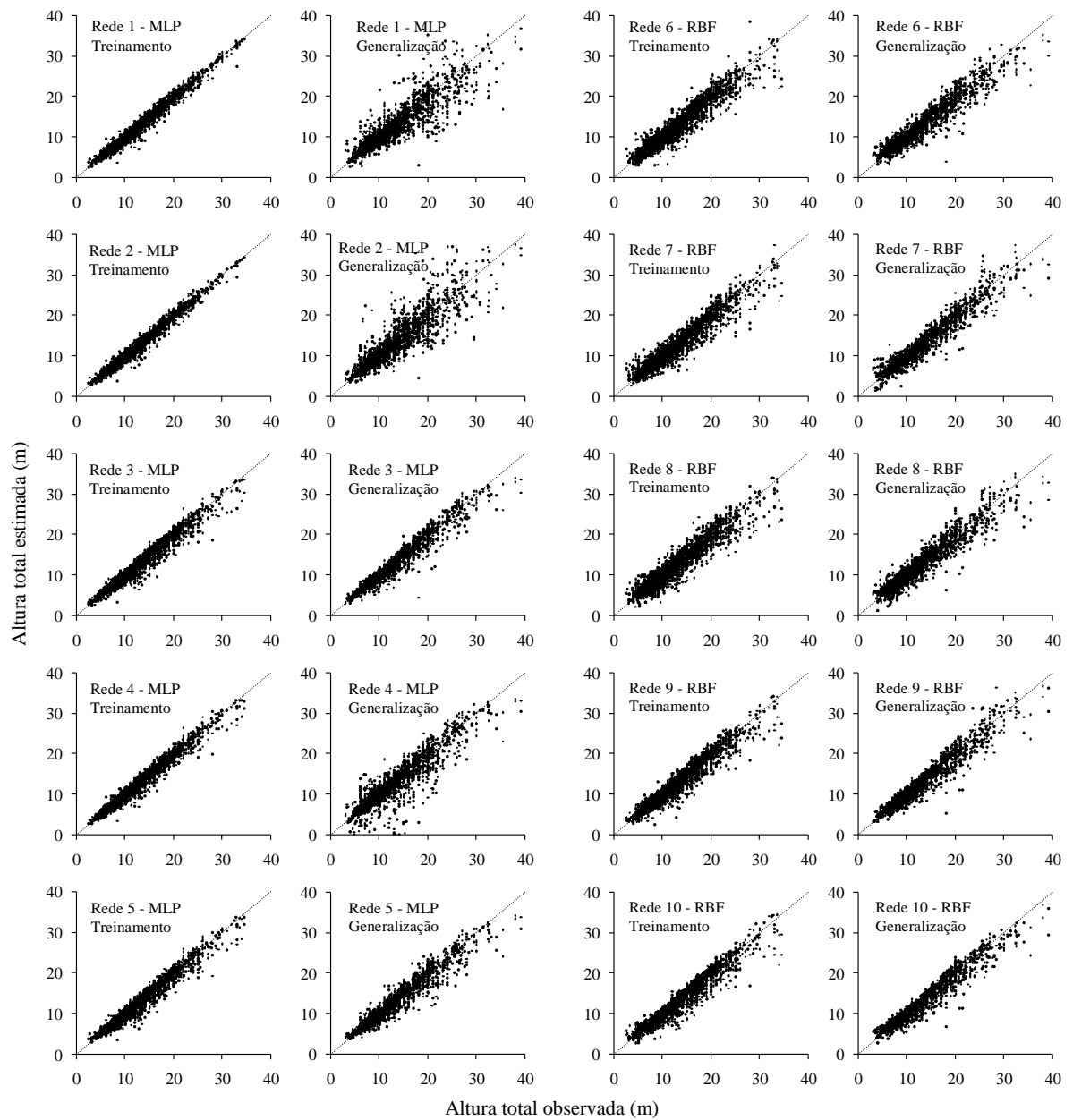


Figura 5 – Altura total de árvores individuais, observados e estimados pelas redes neurais artificiais para os dados de treinamento e generalização.

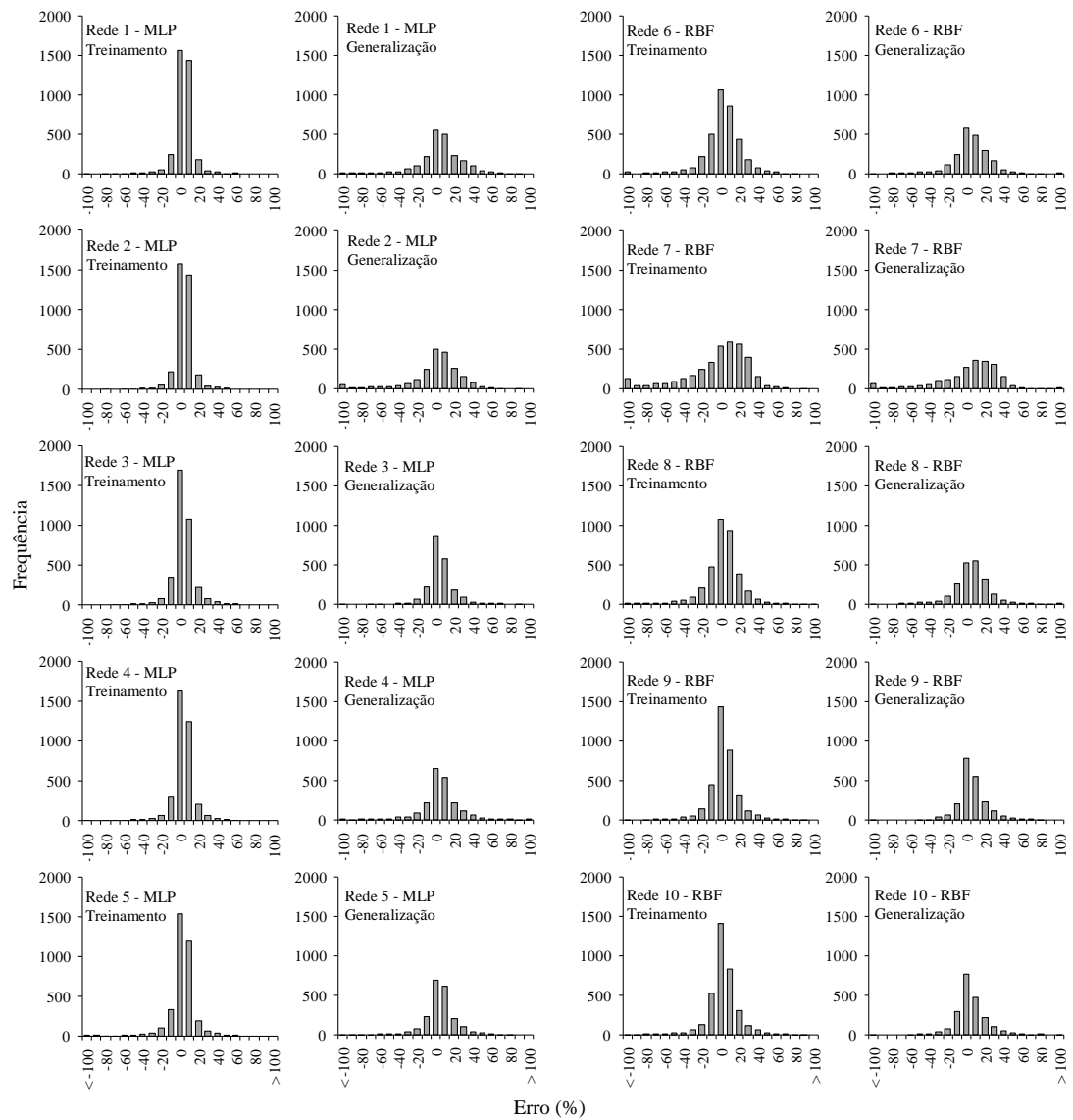


Figura 6 – Distribuição dos resíduos das estimativas do treinamento e da generalização das redes neurais artificiais para projeção da variável altura do fuste.

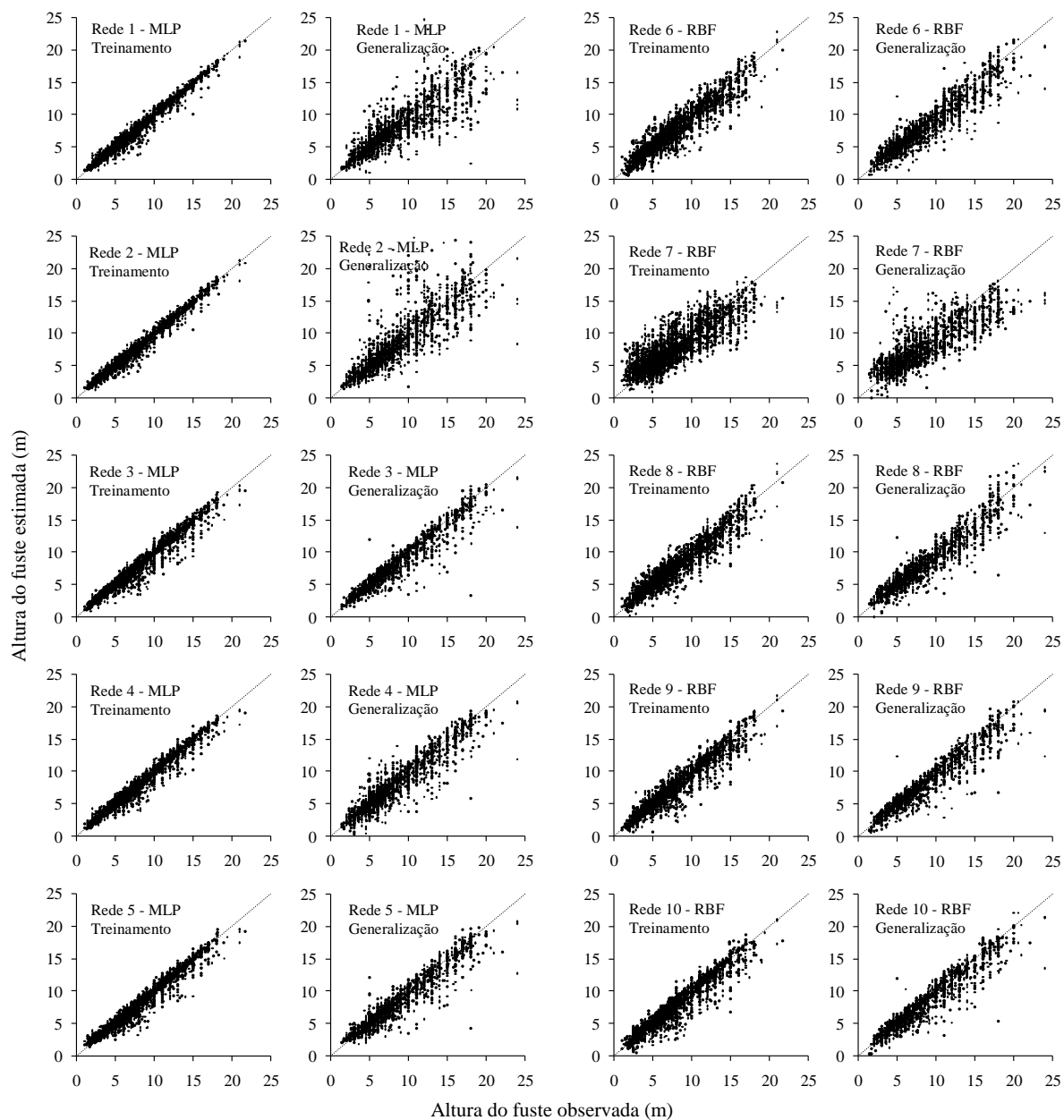


Figura 7 – Altura do fuste de árvores individuais, observados e estimados pelas redes neurais artificiais para os dados de treinamento e generalização.

Porras (2007) obteve sucesso no treinamento de redes neurais com função de ativação tangencial nos neurônios das camadas intermediárias e função linear na camada de saída para projeção do diâmetro e altura de *Pinus cooperi* em uma floresta do México, utilizando índices independentes da distância. Após aplicação das redes aos dados de generalização foram observados valores de r_{yy} superiores a 0,900 para a projeção do *dap* e 0,950 para altura total.

Binoti (2010) obteve valores de $r_{\hat{y}y}$ superiores a 0,980 e RMSE inferiores a 4% no treinamento de redes neurais *Perceptron* (Linear), MLP e RBF para diâmetro e altura de eucaliptos em diferentes condições de crescimento, sem o uso de índices de competição como variáveis entrada. Após aplicação das redes aos dados de generalização, foram observados valores superiores a 0,970 de $r_{\hat{y}y}$ e RMSE inferiores a 5% para ambas as variáveis.

Castro (2011) verificou eficiência de redes neurais do tipo MLP para projeção do diâmetro e altura de árvores em florestas comerciais de eucalipto da região norte do Brasil. As melhores redes apresentaram valores de $r_{\hat{y}y}$ superiores a 0,980 e raiz quadrada do erro médio (RQEM) inferiores a 1% no treinamento das redes. Após a validação do seu modelo, foram encontradas estimativas superiores a 0,900 de $r_{\hat{y}y}$ e RQEM inferiores a 2% para as duas variáveis.

Utilizando modelos de regressão, Adame et al. (2008) encontraram estimativas de $r_{\hat{y}y}$ entre 0,509 e 0,540, após ajustes para crescimento em diâmetro de *Eucalyptus globulus*. Soares e Tomé (1997) encontraram estimativas superiores a 0,90 de $r_{\hat{y}y}$ para *Eucalyptus globulus*. Martins (2011) obteve coeficientes de correlação entre 0,980 e 0,990 em modelos para projeção do diâmetro e altura de eucalipto em diferentes classes de produtividade na região norte do Brasil. Mette et al. (2009) obtiveram estimativas de $r_{\hat{y}y}$ entre 0,670 e 0,930 para *Picea glauca* utilizando diferentes equações de crescimento em altura.

A rede 3 (MLP) apresentou melhor desempenho para estimar, simultaneamente o *dap*, a altura total e a altura do fuste. Esta rede concentrou 186 neurônios na única camada intermediária, utilizando funções de ativação tangencial nos neurônios das camadas intermediária e saída.

Embora não tenha apresentado as melhores estatísticas durante o treinamento para a variável *dap* (Tabela 4), esta rede obteve a melhor precisão em relação aos dados de generalização, para todas as variáveis. As estimativas em relação aos valores observados ficaram próximos à linha 1:1 (Figuras 3, 5 e 7) e concentrando os erros percentuais mais próximos à zero (Figuras 2, 4 e 6).

Verifica-se que não existe a necessidade de se treinar uma rede para cada variável, sendo essa mais uma vantagem do uso de redes neurais artificiais na modelagem do crescimento em nível de árvores individuais.

Pode-se constatar pelas Figuras 2 a 7 que parte das redes, apesar de apresentarem um bom desempenho durante o treinamento, não adquirem a capacidade de generalização com a mesma eficiência.

Mesmo se tratando de uma floresta com elevada heterogeneidade de espécies, com árvores de diferentes idades, taxas de crescimento e sanidade, a projeção obtida neste estudo em nível de árvore foi eficiente. Assim, as redes neurais artificiais têm grande potencial de uso na modelagem do crescimento de árvores em florestas naturais no Brasil.

4. CONCLUSÕES

Com este estudo pode-se concluir que:

- Redes neurais artificiais são eficientes para projetar o diâmetro e a altura de árvores individuais em florestas inequiâneas.
- Uma única rede neural estima de modo eficiente o *dap*, altura total e altura do fuste, simultaneamente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAME, P.; HYNYNEN, J.; CAÑELLAS, I.; RÍO, M. DEL. Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. **Forest Ecology and Management**, v.255, p.1011-1022, 2008.

ANDREASSEN, K., TOMTER, S.M. Basal area growth models for individual trees of norway spruce, scots pine, birch and broadleaves in Norway. **Forest Ecology and Management**, v.180, p.11-24, 2003.

BARRETO, J.M. **Introdução às redes neurais artificiais**. Florianópolis: UFSC, 57 p., 2002.

BELLA, I.E. A new competition model for individual tree. **Forest Science**, v.17, n.3, p.364-372, 1971.

BINOTI, M.L.M.S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T.B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC. 262 f. 2000.

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

CUNHA, A.C.M.C.M. **Diagnose nutricional de minicepas e previsão de enraizamento de miniestacas de eucalipto por redes neurais artificiais**. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

DANIELS, R.F. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. **Forest Science**, v.22, n.4, p.454-456, 1976.

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

EID, T.; TUHUS, E. Models for individual tree mortality in Norway. **Forest Ecology and Management**, v.154, n.1, p.69-84, 2001.

GANDOLFI, S.; LEITÃO-FILHO, H.F.; BEZERRA, C.L. Levantamento florístico e caráter sucessional de espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta Mesófila Semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Revista Brasileira de Biologia**, v.55, n.4, p.753-767, 1995.

GLOVER, G.R.; HOOL, J.N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

GONZÁLEZ, M.S.; RÍO, M.; CAÑELLAS, I.; MONTERO. Distance independent tree diameter growth model for cork oak stands. **Forest ecology and Management**, v.255, n.1, p.262-270, 2006.

GUAN, B.T., GERTNER, G. Modeling red pine tree survival with an artificial neural network. **Forest Science**, v.37, p.1429-1440, 1991.

HASENAUER, H., MONSERUD, R.A. A crow model for Austrian species. **Forest Ecology and Management**, v.84, p.49-60, 1996.

HASENAUER, H., MONSERUD, R.A., GREGOIRE, T.G. Using simultaneous regression techniques with individual-tree growth models. **Forest Science**, v.44, p.87-95, 1998.

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

JAIN, A.K.; MAO, J.; MOHIUDDIN, K.M. **Artificial Neural Networks: A Tutorial**. Computer, v.29, n.3, p.31-44, 1996.

MARTINS, F.B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucalipto**. 2011. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

METTE, T.; ALBRECHT, A.; AMMER, O.; BIBER, P.; KOHNLE, U.; PRETZSCH, H. Evaluation of the forest growth simulator SILVA on dominant trees in mature mixed silver fir - norway spruce stands in south west Germany. **Ecological Modelling**, v.220, n.13-14, p.1670-1680, 2009.

MIEHLE, P., BATTAGLIA, M. SANDS, P.J., FORRESTER, D.I., FEIKEMAC, P.M., LIVESLEY, S.J., MORRIS, J.D., ARNDT, S.T. A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of *Eucalyptus globules* plantations. **Ecological Modelling**, v.220, p.734-746, 2009.

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

PORRAS, J.C. Growth evaluation of a conifer forest (*Pinus Cooperi* Blanco) using a neural net backpropagation trained with distance independent competition measures. **Computación y Sistemas**, v.10, n.4, p.415-427, 2007.

SILVA, J.N.M.; LOPES, J.C.A. **Inventário florestal contínuo em florestas tropicais**: a metodologia utilizada pela Embrapa-Cpatu na Amazônia brasileira. Belém- PA: Embrapa-CPATU, 1984, 36 p. (Documentos 36).

SILVA, L.T.M. **Morfometria, qualidade do tronco e da copa de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. em povoamento experimental no estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007.

SOARES, P., TOMÉ, M. **A distance dependent diameter growth model for first rotation eucalyptus plantation in Portugal**, In: Amaro, A., Tomé, M. (Ed). Empirical and Process - Bases models for forest tree and stand growth simulation. Salamandra, p.267-270, 1997.

STATSOFT, INC. **STATISTICA** (data analysis software system), version 10.0. 2012.

TOMÉ, M.; BURKHART, H.E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual tree. **Forest Science**, v.35, n.3, p.816-831, 1989.

VOSPERNIK, S., MONSERUD, R.A., STERBA, H. Do individual tree growth models correctly represent height: diameter ratios of Norway spruce and scots pine? **Forest Ecology and Management**, v.260, n.10, p.1735-1753, 2010.

WEINGARTNER, M.; MERKL, D.; HASENAUER, H. Improving tree mortality predictions of Norway Spruce stands with neural networks. In: Proceedings of the Symposium on Integration in Environmental Information Systems, **Proceedings...**Zell am See, Austria, 2000.

CAPÍTULO IV

VALIDAÇÃO DE UM MODELO COMPLETO EM NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL PARA UMA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL

RESUMO – O objetivo deste estudo foi validar um modelo completo em nível de árvore individual desenvolvido para uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão. Foi realizada uma simulação com o objetivo de interagir os sub-modelos de mortalidade, crescimento e ingresso, os quais compõem um modelo completo em nível de árvore individual para florestas naturais. Uma rede neural artificial (RNA) foi previamente selecionada para compor o sub-modelo de mortalidade, nas quais realizou a previsão da probabilidade de mortalidade para cada indivíduo entre dois períodos de medição. Outra RNA foi selecionada para projeção do *dap*, altura total e altura do fuste, simultaneamente, para um ano de medição futuro. Já para o sub-modelo de ingresso, foi determinada uma taxa periódica média de ingresso de árvores entre cada período de medição. Para a validação do modelo foram utilizados dados de quatro parcelas monitoradas entre os anos de 1994 e 2008, sendo essas parcelas independentes das utilizadas para gerar os sub-modelos. A partir da medição do ano de 1994, realizou-se a simulação de mortalidade, crescimento e ingresso para os anos de 1997, 2000, 2004 e 2008. Os resultados da simulação foram comparados aos valores observados no ano final da projeção (2008). O modelo completo em nível de árvore individual foi eficiente na simulação do crescimento e produção florestal em todos os níveis de detalhamento (povoamento total, distribuição diamétrica e de altura e em nível de árvore individual). Os resultados encontrados confirmam o potencial de utilização de modelos em nível de árvore individual em florestas naturais estruturalmente complexas, como é o caso da Floresta Estacional Semidecidual Montana em estágio médio de sucessão ecológica.

Palavras-Chave: Floresta Natural Semidecidual Montana, floresta inequiana, redes neurais artificiais; validação de modelos em nível de árvore individual.

1. INTRODUÇÃO

O Bioma Mata Atlântica, que abriga uma vasta diversidade biológica e um alto grau de endemismo, estendia-se, originalmente, por uma área estimada de 1,1 milhões de km² no Brasil (SHIMIZU, 2007; MMA, 2012). Este Bioma, em Minas Gerais, totalizava 46% do território do estado, mas atualmente encontra-se drasticamente alterado, e em sua maioria, por fragmentos de florestas secundárias, com apenas 10% de área remanescente (SOS MATA ATLÂNTICA, 2012).

As florestas remanescentes da Mata Atlântica são fontes muito importantes de produtos madeireiros de alto valor agregado, além de conservar a diversidade biológica. Essas são compostas por um grande número de espécies, com as mais diferentes características silviculturais, ecológicas e tecnológicas (SCOLFORO et al., 1996; ROSSI et al., 2007).

Estimar com precisão a dinâmica de crescimento, mortalidade e ingresso das florestas é um desafio constante dos pesquisadores florestais. Para isso, são utilizados os modelos de crescimento e produção, que permitem simular a dinâmica natural destas florestas, de modo a prever sua produção ao longo do tempo, sob hipóteses de exploração ou quando sujeitas a agentes físicos e bióticos (TOMÉ, 1991; VANCLAY, 1994).

No caso das florestas naturais no Brasil, os métodos mais empregados para prognose da produção são a Cadeia de Markov e o método de razão de movimentação (AUSTREGÉSILO et al., 2004; TEIXEIRA et al., 2007; STEPKA et al., 2010), cujas estimativas se restringem ao nível de classes diamétricas ou povoamento. No entanto, torna-se cada vez mais importante o detalhamento das informações acerca do crescimento e dinâmica das florestas em nível de árvore, principalmente para produção de madeira de alta qualidade ou alta importância

ecológica e estes métodos não são capazes de oferecer entendimento suficiente em nível de árvore, espécie ou grupo de espécies.

Neste sentido, surge como alternativa o modelo de crescimento em nível de árvore individual (MAI), que embora seja mais complexo, por ser constituído por um conjunto de sub-modelos, permite ao manejador simular e entender o crescimento das árvores e da floresta sob diferentes condições, como por exemplo, densidade de árvores, competição, entre outros.

Os MAI são compostos por sub-modelos (VANCLAY, 1994), sendo os principais aqueles que estimam a mortalidade e o crescimento das variáveis dendrométricas (altura e diâmetro). Outras variáveis, como dimensões das copas, por exemplo, podem ser consideradas, caso estas sejam variáveis explicativas nos demais sub-modelos. Além disso, no estudo de florestas naturais, torna-se necessário estimar também o ingresso de novas árvores (HASENAUER, 2000). Com a aplicação destes sub-modelos torna-se possível a simulação do crescimento e produção em nível de árvores individuais.

Assim sendo, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de validar um modelo completo em nível de árvore individual utilizando redes neurais artificiais, desenvolvido para um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão ecológica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. *Dados*

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos no município de Viçosa, Minas Gerais, em um fragmento florestal pertencente à Universidade Federal de Viçosa, que possui 17 ha de área (42°52'W e 42° 50'W de longitude e 20° 44'S e 20° 47'S de latitude), pertencente à região fitoecológica de Floresta Estacional Semidecidual Montana em estágio médio de sucessão.

Para o presente trabalho, foram amostrados 0,4 hectares, divididos em quatro parcelas permanentes de 1.000 m² (20m x 50m). Em cada parcela, foram identificadas as árvores e mensurados os diâmetros a 1,3 m de altura (*dap*), as alturas total (*Ht*) e do fuste (*Hf*) de todas as árvores com *dap* ≥ 5 cm, bem como identificados os indivíduos que morreram e ingressaram entre cada medição sucessiva.

Para cada árvore foram determinadas as coordenadas x e y em relação à origem da sua parcela, para criação de um mapa de localização dos indivíduos dentro de cada parcela e estimação dos índices de competição. Os inventários foram realizados nos anos de 1994, 1997, 2000, 2004 e 2008, resultando em um total de 2.062 casos, sendo observados neste período, 181 casos de mortalidade e 146 casos de ingresso. O inventário de 1994 foi utilizado para iniciar a simulação, enquanto os demais foram utilizados apenas para comparação das estimativas do modelo completo aos valores reais.

Todos os indivíduos mensurados foram classificados em relação aos níveis de infestação por cipós, iluminação de copa e qualidade de copa, conforme proposto por Silva e Lopes (1984), além de serem classificados em grupos ecológicos (GANDOLFI et al., 1995) (Tabela 1).

Tabela 1– Critérios para classificação dos indivíduos em relação à infestação por cipós, iluminação de copa, qualidade da copa e grupo ecológico

Critérios para classificação	Classe
<i>Infestação por Cipós</i>	
Sem presença de cipós	1
Presença de cipós somente no fuste	2
Presença de cipós somente na copa	3
Presença de cipós no fuste e na copa	4
<i>Iluminação de copa</i>	
Copa recebendo radiação solar direta na sua parte superior e lateral	1
Copa recebendo radiação solar direta na sua parte superior	2
Ausência de radiação solar direta na copa	3
<i>Qualidade da copa</i>	
Boa: copa normal, sem presença de danos	1
Regular: copa com algum dano de pequena escala	2
Inferior: copa com severos danos, com poucos galhos e folhas	3
<i>Grupo Ecológico</i>	
Espécies dependentes de luz e que não ocorrem no sub- bosque, se desenvolvendo em clareiras ou bordas da floresta	Pioneiras (PI)
Desenvolvem-se em condições de sombreamento médio, como pequenas clareiras e sub-bosque não densamente sombreado	Secundárias iniciais (SI)
Desenvolvem-se no sub-bosque em condições de sombra leve ou densa, podendo crescer até alcançar o dossel	Secundárias tardias (ST)
Espécies que em função da carência de informações não foram incluídas em nenhuma das categorias	Sem classificação (SC)

2.2. Validação do modelo completo de árvore individual (projeção)

A validação do modelo completo consistiu em aplicar sub-modelos de mortalidade, crescimento e ingresso, que interagiram durante a simulação. A projeção durante o intervalo de estudo (1994-2008) foi feita com a utilização apenas dos dados do inventário realizado no ano de 1994 das parcelas que não estavam presentes no treinamento das redes (sub-modelos).

As projeções foram realizadas para os seguintes intervalos de tempo: 1994-1997; 1997-2000; 2000-2004; 2004-2008, e comparadas aos valores observados após a simulação. O fluxograma de passos básicos e decisões seguidas neste trabalho é apresentado na Figura 1.

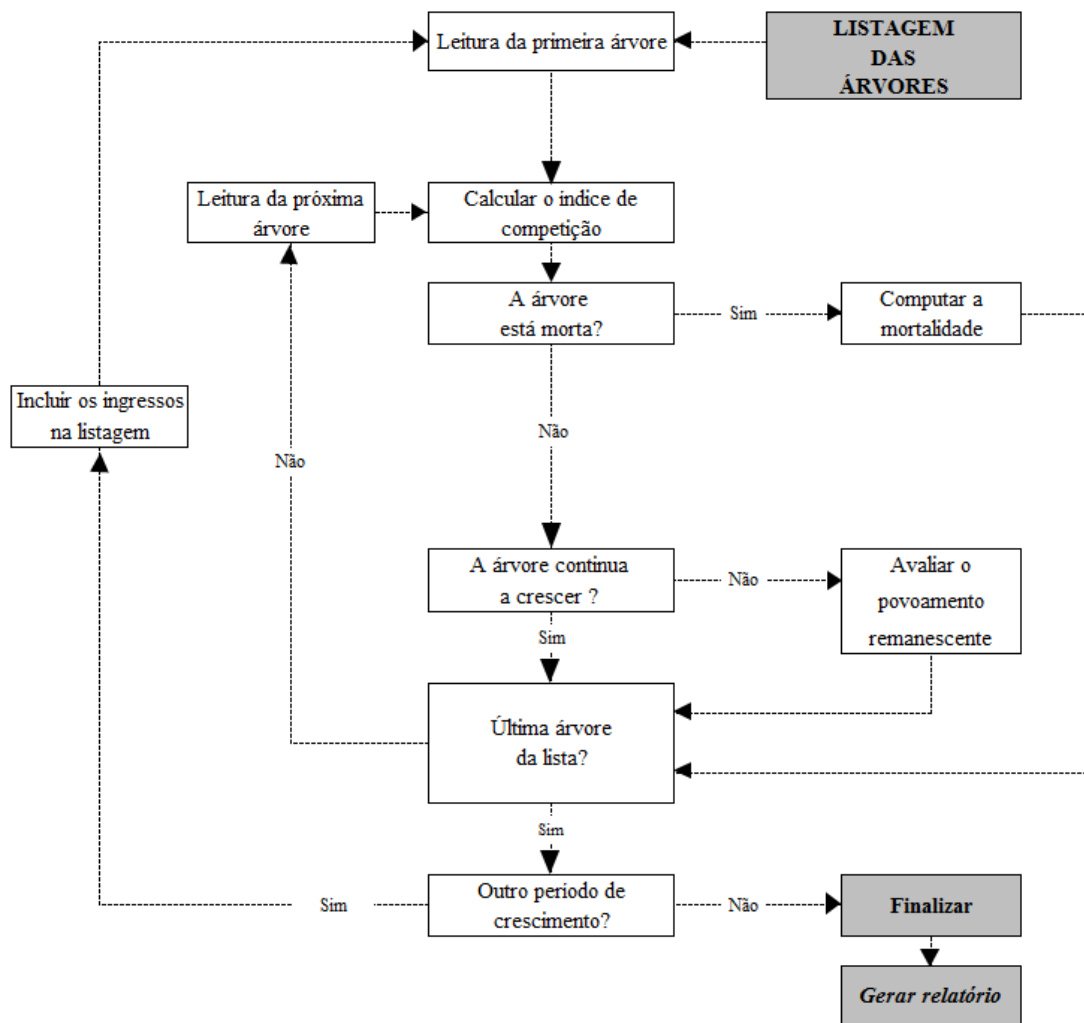


Figura 1 - Fluxograma para utilização de um modelo em nível de árvore individual em uma floresta natural.

Fonte: Adaptado de Davis e Johnson (1987).

2.3. Índices de competição

Para cada fuste (unidade básica do estudo) durante os períodos da simulação, foram calculados um índice de competição dependente da distância para a estimativa de probabilidade de mortalidade (IDD_m) e dois índices de competição semi-independentes da distância (ISD), para as estimativas do crescimento em diâmetro (ISD_d) e crescimento em altura (ISD_h), cujos estimadores são:

$$IDD_m = \sum_{j=1}^{n_j} \frac{DAP_i}{DAP_j \cdot L_{ij}} \quad (1)$$

$$ISD_d = \frac{Ht_i}{\overline{Ht}_n} \quad (2)$$

$$ISD_h = \frac{AS_i^2}{ASq^2} \quad (3)$$

em que: dap_i = diâmetro com casca (dap) do fuste da árvore-objeto medido a 1,30 m (cm); dap_j = diâmetro com casca (dap) do fuste da árvore-competidora medido a 1,30 m (cm); L_{ij} = distância entre a árvore-objeto e a árvore competidora (cm); n_j = número de fustes competidores limitados a um raio de competição de 6 m; Ht_i = altura total do fuste da árvore-objeto (m); \overline{Ht}_n = altura média dos fustes de n árvores próximas da árvore-objeto (m), limitadas a um raio de competição de 6 m; AS_i = área seccional do fuste da árvore-objeto, medido a 1,30 m (m²), ASq = área seccional correspondente ao diâmetro médio (q) dos fustes das árvores vizinhas (m²).

2.4. Sub-modelo de mortalidade

Foi utilizada uma rede neural previamente selecionada para estimativa da probabilidade de mortalidade dos indivíduos. Essa é caracterizada por uma rede do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP), com quatorze neurônios na única camada intermediária e com função de ativação exponencial nas camadas intermediária e de saída, utilizando como uma das variáveis independentes (entrada), um índice de competição dependente da distância (Tabela 2).

Tabela 2 – Características da rede neural selecionada para estimar a probabilidade de mortalidade em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais

Tipo de rede	Arquitetura da Rede para mortalidade*	Saída (numérica)	Entradas Numéricas	Entradas Categóricas	Função de ativação		r_{xy}
					Camada intermediária	Camada de saída	
MLP	60-14-1	Pm	$A_1, A_2, dap_1, Ht_1, IDD_m$	F, GE, C, IC, QC	Exponencial	Exponencial	0,58

em que MLP é uma rede *Multilayer Perceptron*; (*) indica o número de neurônios da camada de entrada, intermediária e saída, respectivamente; Pm é a probabilidade de mortalidade entre dois períodos de medição; A_1 e A_2 são os anos de medição atual e futuro, respectivamente; dap_1 é o diâmetro a 1,3 m (cm) atual; Ht_1 é a altura total atual; IDD_m é o índice de competição dependente da distância; F é a família botânica do indivíduo; GE é o grupo ecológico; C é o nível de infestação por cipó; IC é o nível de iluminação da copa e QC é o nível de qualidade da copa.

A rede em formato “.xml” ou “.snn” pode ser obtida por e-mail: <castrorvo@ymail.com>.

Após estimada a probabilidade de mortalidade Pm para cada indivíduo em um dado período, esta foi comparada com um número aleatório (Pa) entre zero e um, segundo Pretzsch et al., (2002). A regra de decisão para a mortalidade no período de projeção foi: se $Pm > Pa$, o indivíduo morre, caso contrário, permanece vivo. Como

se trata de um processo aleatório, este procedimento foi repetido 30 vezes, a fim de obter uma tendência média da estimativa de mortalidade para cada período de projeção. A amostra que mais se aproximou do valor médio das 30 repetições em cada período foi aquela selecionada para compor a lista de árvores mortas.

2.5. Sub-modelo de crescimento

Para a projeção do crescimento em dap , altura total (Ht) e altura do fuste (Hf) simultaneamente, foi utilizada uma rede neural do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP), com 186 neurônios na única camada intermediária e com função de ativação tangencial nas camadas intermediária e de saída, utilizando dentre as variáveis independentes, dois índices de competição semi-independentes da distância (Tabela 3).

Tabela 3 – Características da rede neural selecionada para projetar o dap , altura total (Ht) e altura do fuste (Hf) das árvores em uma Floresta Estacional Semidecidual Montana, em estágio médio de sucessão, localizada em Viçosa - Minas Gerais

Tipo de rede	Arquitetura da Rede para crescimento*	Saídas (numérica)	Entradas Numéricas	Entradas Categóricas	$r_{\dot{y}y}$ (dap)	$r_{\dot{y}y}$ (Ht)	$r_{\dot{y}y}$ (Hf)
MLP	61-186-3	dap_2, Ht_2, Hf_2	$A_1, A_2, dap_1, Ht_1, Hf_1, ISD_d, ISD_h$	F, GE, C, IC, QC	0,9952	0,9800	0,9801

em que MLP é uma rede *Multilayer Perceptron*; (*) indica o número de neurônios da camada de entrada, intermediária e saída, respectivamente; dap_1 e dap_2 são os diâmetros a 1,3 m (cm) atual e futuro, respectivamente; Ht_1 e Ht_2 são as alturas totais (m) atual e futura, respectivamente; Hf_1 e Hf_2 são as alturas dos fustes (m) atual e futura, respectivamente; A_1 e A_2 são as medições atuais e futuras, respectivamente; ISD_d e ISD_h são índices de competição semi-dependentes da distância; F é a família botânica do indivíduo; GE é o grupo ecológico; C é o nível de infestação por cipó; IC é o nível de iluminação da copa e QC é o nível de qualidade da copa.

A rede em formato “.xml” ou “.snn” pode ser obtida por e-mail: <castrorvo@ymail.com>.

2.6. Sub-modelo de ingresso

Devido à ausência de dados coletados de regeneração ($dap < 5$ cm) durante o período de estudo, não existiam informações que antecedessem o evento de ingresso das árvores para o treinamento de redes neurais artificiais. Para que a simulação do crescimento e produção da floresta não fosse comprometida pela falta deste sub-modelo, foi determinada uma taxa média de ingresso a partir dos mesmos dados que originaram os demais sub-modelos, e essa taxa foi adotada para cada período de projeção nos dados de validação.

O indivíduo que ingressaria durante o período de projeção foi definido de forma aleatória, com base na listagem das árvores observada no período de estudo. Cada indivíduo que ingressou foi alocado em uma das parcelas de validação, também de forma aleatória.

Para que fosse possível o cálculo dos índices de competição dependentes e semi-independentes da distância durante a simulação, foi definido aleatoriamente coordenadas x (entre 0 e 20m) e y (entre 0 e 50m) para que essas árvores que ingressaram se posicionassem nas parcelas.

Foi estipulado também que todos os ingressos possuíssem *dap* igual a 5,92 cm, altura total igual a 7,42 m e altura do fuste igual a 4,47 m, conforme valores médios das árvores ingressas (observados nos dados para geração dos sub-modelos). As qualificações quanto ao nível de infestação por cipó e o nível de qualidade da copa foram iguais “1” e nível de iluminação da copa igual a “3”. Adotou-se também que as árvores ingressas não se bifurcavam durante a simulação.

Detalhes da sequência de simulação são apresentados no Apêndice 1.

2.7. Avaliação da projeção aplicando o modelo completo de árvore individual

O volume de cada indivíduo no ano final da projeção (ano de 2008) foi estimado de acordo com a fórmula do Cetec (1995), para florestas em estágio sucessional secundário:

$$VT_{cc} = 0,000074230 \cdot dap^{1,707348} \cdot Ht^{1,16873} \quad R^2=0,972 \quad (4)$$

em que: VT_{cc} é o volume total com casca, em m³; *dap* é o diâmetro à 1,3 m, em cm; *Ht* é a altura total em m e R^2 é o coeficiente de determinação.

Foram elaborados gráficos de barras e de dispersão para comparar os dados projetados (validação) com os dados observados, em diferentes níveis de detalhamento (povoamento total, distribuição diamétrica e de altura, e árvore individual), considerando as seguintes variáveis:

- volume por hectare para cada parcela no último ano de medição (2008);
- frequência de indivíduos para cada parcela no ano de 2008;
- frequências de indivíduos mortos e ingressos nos quatro períodos de projeção;
- distribuição diamétrica e de altura no último ano de medição (2008).

Para verificar a aderência dessas estimativas com os valores observados utilizou-se o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (SOKAL e ROHLF, 1969), cuja estatística é dada por:

$$dn = \text{Max}|F_o(x) - F_e(x)| \quad (5)$$

em que: dn é o valor calculado da estatística de K-S; $F_o(x)$ é a frequência acumulada observada; $F_e(x)$ é a frequência acumulada estimada.

A hipótese nula (H_0 : as estimativas não diferem dos valores reais) foi rejeitada para o valor calculado de dn maior que o valor tabelado, ao nível de significância α igual a 5%.

Para avaliar a precisão das projeções do *dap*, altura total e altura do fuste, foram elaborados gráficos de dispersão, histogramas de resíduos, bem como calculadas as estatísticas de correlação ($r_{\hat{y}y}$) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE) entre os dados projetados e observados no ano de 2008. Quanto maior o coeficiente de correlação (próximo a 1) e menor a RMSE, melhor a previsão da estimativa.

$$r_{\hat{y}y} = \frac{\text{cov}(Y, \hat{Y})}{\sqrt{S^2(Y)S^2(\hat{Y})}} \quad (6)$$

$$\text{RMSE}(\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} / \bar{Y} \quad (7)$$

em que: Y_i é a variável de saída observada; \hat{Y}_i é a variável de saída estimada; cov é a covariância; S^2 é a variância; n é o número total de dados; \bar{Y} é a média da saída observada.

Realizaram-se também comparações entre os índices de valor de importância (IVI%) (SOARES et al., 2011) da estrutura horizontal observada e simulada para o ano de 2008, pelo teste F (GRAYBILL, 1976).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela totalização dos volumes das árvores em cada parcela de validação no ano de 2008, ano final da simulação, observou-se leve tendência de subestimação dos volumes por hectare em torno de 5% (Figuras 6a), diferença que não foi significativa pelo teste K-S ($p < 0,05$). Devido à variabilidade de produtividade entre as parcelas na área de estudo (volumes entre 245 e 637 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), em função principalmente da localização das parcelas na área e presença de árvores remanescentes de grande porte, a diferença entre os valores observados e as estimativas pode ser considerada satisfatória.

Em relação à frequência dos indivíduos estimados para o ano de 2008, observa-se precisão das estimativas – teste K-S não significativo ($p < 0,05$), com desvio médio de 0,3% (Figura 6b).

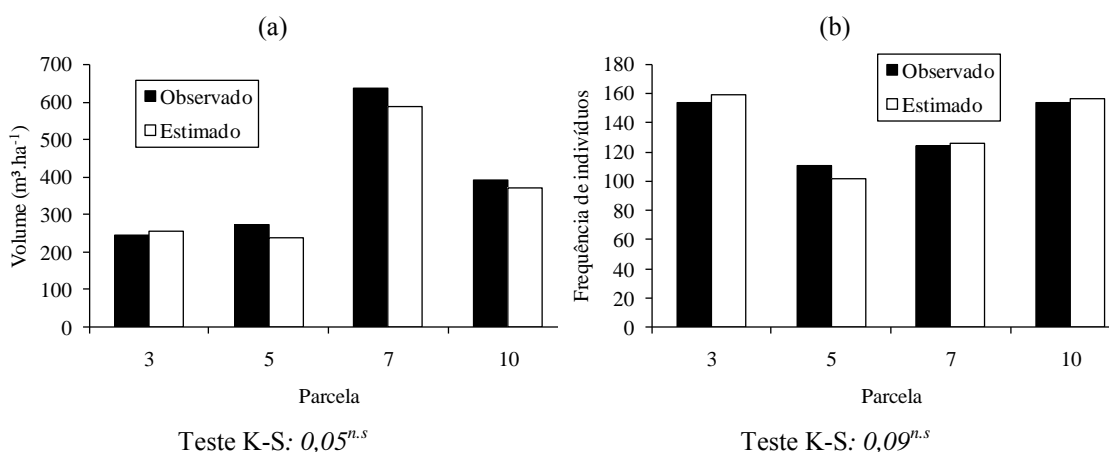


Figura 6 - Volume por hectare observado e estimado pelo modelo completo em nível de árvore individual (a) e frequência de indivíduos observados e estimados (b) para as parcelas de validação, no ano de 2008.

Pela análise da Figura 7a pode-se inferir que o sub-modelo de mortalidade foi eficiente durante o período de simulação, sendo observado um desvio médio de -7%. A precisão dessa estimativa foi confirmada pelo teste K-S ($p < 0,05$).

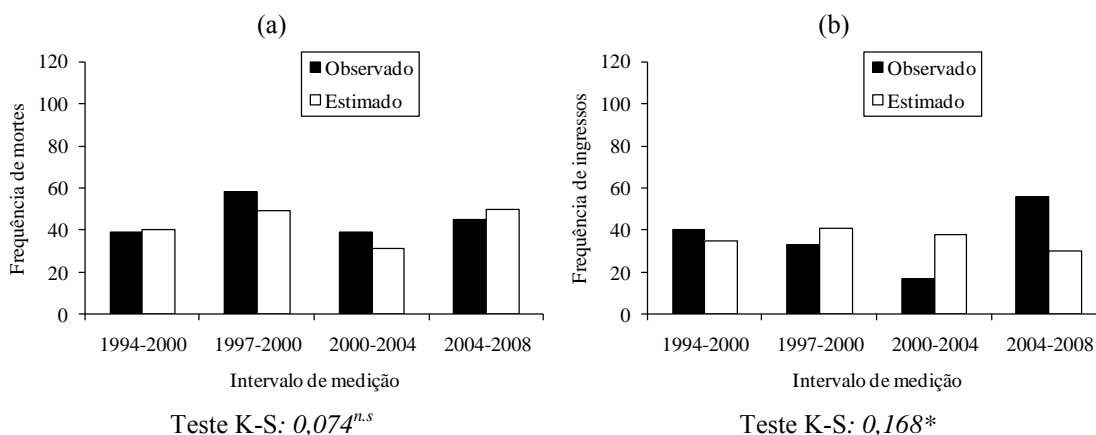


Figura 7 – Frequência de indivíduos mortos (a) e ingressos (b), observados e estimados pelo modelo completo em nível de árvore individual no período de projeção (1994-2008).

A tendência obtida na validação do modelo está em conformidade com resultados descritos na literatura para estimativas de mortalidade (MONSERUD e STERBA, 1999; TAYLOR e MACLEAN, 2007). Uma característica importante para a modelagem de mortalidade é a necessidade de um banco de dados que represente bem a população em estudo (MONSERUD e STERBA, 1999). No presente trabalho, apesar do grande número de árvores, o número de árvores mortas não foi tão grande, e mesmo assim as estimativas obtidas para mortalidade foram precisas.

Em relação à frequência de árvores ingressas durante os períodos de projeção (Figura 7b), foi observado um desvio médio de -22% em relação aos valores observados, e apresentou estimativas estatisticamente diferentes dos dados reais para essa variável pelo teste K-S ($p > 0,05$). Constatou-se que o ponto de maior divergência para o ingresso foi no último intervalo de projeção, o que ocasionou a maior diferença.

Em outros trabalhos, o ingresso também foi tratado como problema em simulações do crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica (PULZ, 1998; AUSTREGÉSILO et al., 2004).

O sub-modelo de ingresso deve ser aprimorado em estudos de crescimento e produção em nível de árvore individual para florestas naturais. Para tanto, torna-se

necessário a coleta de informações que antecedem esse evento (dados de regeneração), como variáveis explicativas para realização da previsão com maior eficiência.

As estimativas da frequência de indivíduos por classe de diâmetro e por classe de altura (Figuras 8 a e b) foram estatisticamente iguais aos valores observados no ano de 2008 pelo teste K-S ($p < 0,05$).

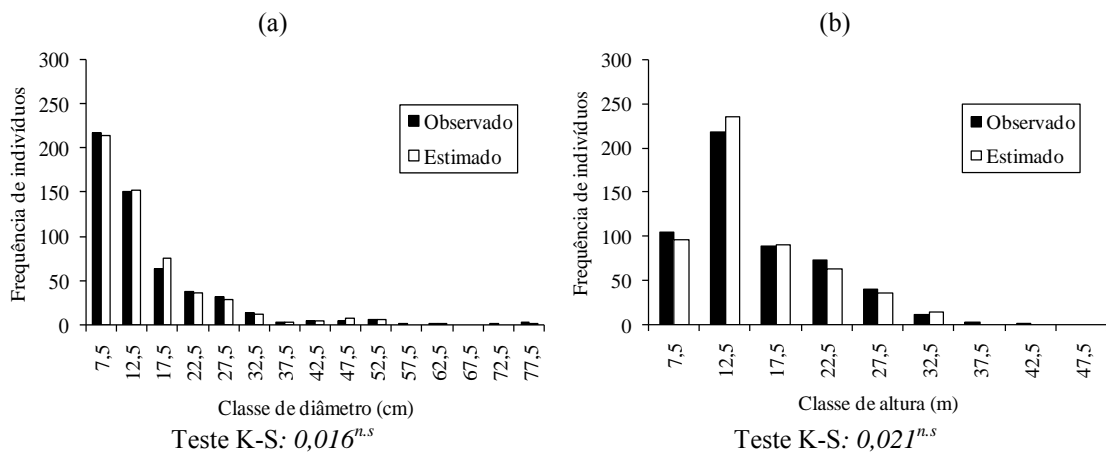


Figura 8 – Distribuição diamétrica (a) e de altura (b) observada e estimada pelo modelo de árvore individual no ano final de projeção (2008).

Cabe-se destacar que este é o nível de detalhamento obtido pelos principais trabalhos que simulam o crescimento de florestas naturais no Brasil (nível de distribuição diamétrica pelo método da matriz de transição – Cadeia de Markov) (FREITAS e HIGUCHI, 1993; AZEVEDO et al., 1995; SANQUETTA et al., 1996; PULZ et al., 1999; ARCE et al., 2001; AUSTREGÉSILO et al., 2004; MENON, 2010; STEPKA et al., 2010). Na maioria destes trabalhos, apesar de obtido sucesso na modelagem, foi identificada falta de consistência nas menores classes de diâmetro, principalmente devido ao ingresso, o que não foi verificado neste trabalho no final da simulação (Figura 8).

Em nível de árvore individual, observa-se, na Figura 9, a exatidão das estimativas do modelo completo para estimativa das variáveis *dap* (a), altura total (b) e altura do fuste (c), haja vista a concentração das estimativas dos erros em torno de zero e tendência de distribuição das estimativas e dos valores observados em torno da linha de 45° no gráfico de dispersão.

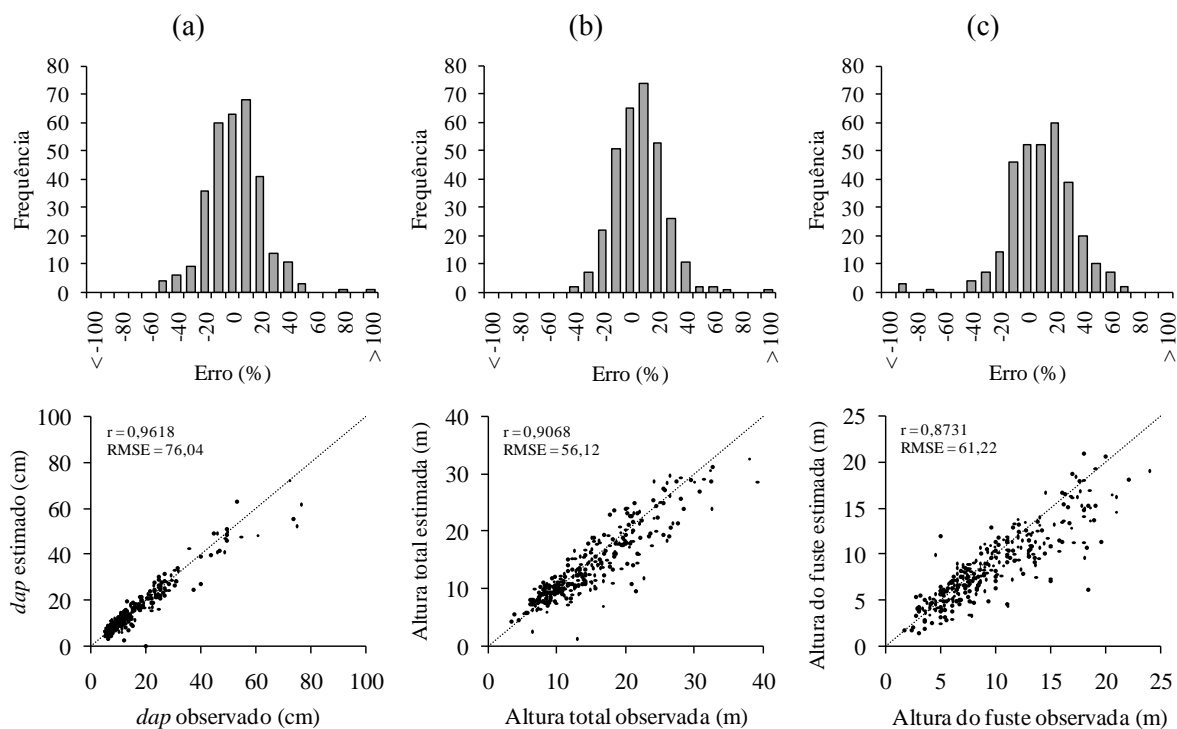


Figura 9 – Histograma de resíduos, e valores observados versus estimados de *dap* (a), altura total (b) e altura do fuste (c) obtidas pelo modelo completo em nível de árvore individual no ano final de projeção (2008).

Este modelo em nível de árvore individual apresenta algumas vantagens em relação aos tradicionais modelos de prognose de florestas naturais, os quais consideram apenas dois períodos de medição para construir os modelos com base em uma matriz de probabilidade. Neste trabalho, as projeções não contemplam apenas as alterações obtidas em um único período, mas alterações de quatro períodos (1994-1997; 1997-2000; 2000-2004; 2004-2008). Outra vantagem que merece destaque é que o período de projeção não é limitado a apenas períodos múltiplos como àqueles que originaram o modelo.

Ao comparar a estrutura horizontal (EH) resultante da simulação no ano de 2008 com a observada, verificou-se que das 17 espécies que representam juntas mais de 50% do IVI da floresta na EH observada, 14 delas (82%) também se apresentaram entre as 17 mais importantes na estrutura projetada.

Pela comparação do IVI das espécies das estruturas observada e estimada, verificou coincidência pelo teste *F*, indicando que a simulação foi precisa e não

influenciou significativamente a estrutura horizontal da floresta no ano final da simulação ($p > 0,05$; $R^2 = 92,85\%$; $\bar{E} = 4,9\%$) (Tabela 4).

Tabela 4 – Estrutura horizontal das parcelas de validação observada e estimada pelo modelo completo de árvore individual no de 2008, em uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão ecológica

Nome Científico	Estrutura Horizontal Observada					Estrutura Horizontal Estimada				
	DR	DoR	FR	IVI	Ranking de IVI	DR	DoR	FR	IVI	Ranking de IVI
<i>Anadenanthera peregrina</i>	4,24	21,04	2,25	9,18	1	5,25	20,68	2,05	9,33	1
<i>Newtonia contorta</i>	5,71	18,46	1,69	8,62	2	3,89	13,11	1,03	6,01	2
<i>Bathysa nicholsonii</i>	10,87	2,98	1,69	5,18	3	8,95	2,52	2,05	4,51	4
<i>Siparuna arianaeae</i>	10,87	1,58	2,25	4,90	4	11,67	2,20	2,05	5,31	3
<i>Casearia ulmifolia</i>	4,05	4,01	2,25	3,44	5	3,11	2,92	2,05	2,69	5
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	3,13	2,58	1,12	2,28	6	2,92	3,06	1,03	2,33	7
<i>Apuleia leiocarpa</i>	2,21	2,09	1,69	1,99	7	1,56	1,25	1,54	1,45	16
<i>Aparisthium cordatum</i>	2,95	0,66	1,69	1,76	8	4,47	1,13	2,05	2,55	6
<i>Machaerium floridum</i>	1,66	1,73	1,69	1,69	9	2,14	2,62	1,54	2,10	8
<i>Platypodium elegans</i>	1,10	2,83	1,12	1,69	10	1,17	3,35	1,03	1,85	10
<i>Albizia polycephala</i>	1,47	2,45	1,12	1,68	11	1,75	3,18	1,03	1,99	9
<i>Cecropia hololeuca</i>	0,74	2,99	1,12	1,62	12	0,58	2,76	1,03	1,46	15
<i>Casearia arborea</i>	1,10	2,40	0,56	1,36	13	0,97	2,15	0,51	1,21	21
<i>Rollinia sylvatica</i>	1,29	1,63	1,12	1,35	14	2,14	2,13	1,03	1,77	11
<i>Allophylus edulis</i>	1,47	0,81	1,69	1,32	15	0,97	0,54	1,54	1,02	26
<i>Lacistema pubescens</i>	1,47	0,69	1,69	1,28	16	2,14	0,92	1,54	1,53	13
<i>Myrcia formosiana</i>	1,47	0,68	1,69	1,28	17	1,36	0,79	1,54	1,23	20
<i>Prunus sellowii</i>	2,03	0,66	1,12	1,27	18	1,56	0,51	1,03	1,03	24
<i>Trichilia lepidota</i>	1,47	0,59	1,69	1,25	19	1,17	0,74	1,03	0,98	28
<i>Trichilia catigua</i>	1,47	0,58	1,69	1,25	20	1,56	0,52	2,05	1,37	17
<i>Ocotea pubescens</i>	1,66	0,32	1,69	1,22	21	0,97	0,25	1,54	0,92	32
<i>Ocotea odorifera</i>	1,47	0,41	1,69	1,19	22	1,36	0,42	1,03	0,94	31
<i>Heisteria silviani</i>	1,10	1,20	1,12	1,14	23	0,78	1,11	1,03	0,97	30
<i>Nectandra lanceolata</i>	0,55	2,24	0,56	1,12	24	0,58	1,91	0,51	1,00	27
<i>Luehea speciosa</i>	0,74	0,34	2,25	1,11	25	0,97	1,87	1,54	1,46	14
<i>Rapanea umbellata</i>	0,92	0,55	1,69	1,05	26	0,78	0,58	1,03	0,80	37
<i>Ocotea dispersa</i>	0,92	0,40	1,69	1,00	27	1,17	0,55	2,05	1,26	19
<i>Jacaranda macrantha</i>	1,29	0,44	1,12	0,95	28	1,75	0,69	1,54	1,33	18
<i>Tovomitopsis saldanhae</i>	1,29	0,86	0,56	0,90	29	1,36	1,22	0,51	1,03	23
<i>Rollinia laurifolia</i>	0,55	0,91	1,12	0,86	30	0,39	0,28	1,03	0,56	48
<i>Amaioua guianensis</i>	0,55	0,23	1,69	0,82	31	0,39	0,21	1,03	0,54	50
<i>Endlicheria paniculata</i>	0,92	0,42	1,12	0,82	32	0,97	0,83	1,54	1,11	22
<i>Inga Alba</i>	0,55	1,32	0,56	0,81	33	0,39	1,13	0,51	0,68	43
<i>Machaerium stipitatum</i>	0,74	0,50	1,12	0,79	34	0,58	0,61	1,03	0,74	40
<i>Vitex sellowiana</i>	0,37	1,39	0,56	0,77	35	0,19	0,23	0,51	0,31	79
<i>Trichilia pallida</i>	0,74	0,43	1,12	0,76	36	0,39	0,16	1,03	0,52	52
<i>Brosimum sellowii</i>	0,55	0,52	1,12	0,73	37	0,39	0,15	0,51	0,35	71
<i>Machaerium brasiliense</i>	0,37	1,17	0,56	0,70	38	0,19	0,59	0,51	0,43	65
<i>Sorocea bonplandii</i>	0,74	0,18	1,12	0,68	39	0,39	0,07	1,03	0,50	57
<i>Casearia decandra</i>	0,37	0,55	1,12	0,68	40	0,58	0,70	1,03	0,77	38
<i>Mabea fistulifera</i>	0,92	0,49	0,56	0,66	41	1,95	0,92	2,05	1,64	12
<i>Copaifera langsdorffii</i>	0,74	0,62	0,56	0,64	42	0,58	0,55	1,03	0,72	41
<i>Sapium glandulatum</i>	0,37	0,99	0,56	0,64	43	0,39	1,52	0,51	0,81	36
<i>Ocotea minarum</i>	0,37	0,97	0,56	0,63	44	0,19	0,43	0,51	0,38	69
<i>Guettarda viburnoides</i>	0,55	0,18	1,12	0,62	45	0,19	0,14	0,51	0,28	83
<i>Myrcia anceps</i>	0,55	0,17	1,12	0,62	46	0,19	0,02	0,51	0,24	113
<i>Citrus sp.</i>	0,92	0,34	0,56	0,61	47	0,39	0,05	1,03	0,49	59
<i>Casearia sylvestris</i>	0,92	0,34	0,56	0,61	48	1,56	0,49	1,03	1,02	25
<i>Erythroxylum pelleterianum</i>	0,55	0,10	1,12	0,59	49	0,58	0,24	1,03	0,62	44

Tabela 4 – Continua...

Nome Científico	Estrutura Horizontal Observada					Estrutura Horizontal Estimada				
	DR	DoR	FR	IVI	Ranking de IVI	DR	DoR	FR	IVI	Ranking de IVI
<i>Ocotea corymbosa</i>	0,55	0,09	1,12	0,59	50	0,58	0,13	1,03	0,58	46
<i>Inga affinis</i>	0,37	0,77	0,56	0,57	51	0,39	0,72	0,51	0,54	51
<i>Platymiscium pubescens</i>	0,55	0,57	0,56	0,56	52	0,97	1,06	0,51	0,85	34
<i>Eugenia florida</i>	0,37	0,16	1,12	0,55	53	0,19	0,05	0,51	0,25	92
<i>Virola sebifera</i>	0,18	0,88	0,56	0,54	54	-	-	-	-	-
<i>Dalbergia nigra</i>	0,37	0,67	0,56	0,53	55	0,39	2,03	0,51	0,98	29
<i>Guatteria villosissima</i>	0,37	0,10	1,12	0,53	56	0,39	0,10	1,03	0,51	53
<i>Cabralea canjerana</i>	0,37	0,09	1,12	0,53	57	-	-	-	-	-
<i>Carpotroche brasiliensis</i>	0,37	0,07	1,12	0,52	58	0,19	0,04	0,51	0,25	97
<i>Guapira opposita</i>	0,37	0,07	1,12	0,52	59	0,39	0,14	0,51	0,35	73
<i>Maytenus robusta</i>	0,55	0,40	0,56	0,50	60	0,39	0,60	0,51	0,50	56
<i>Tapirira peckoltiana</i>	0,55	0,20	0,56	0,44	61	0,58	0,23	0,51	0,44	64
<i>Melanoxylon brauna</i>	0,55	0,16	0,56	0,42	62	0,39	0,16	0,51	0,35	70
<i>Sloanea monosperma</i>	0,37	0,30	0,56	0,41	63	0,39	0,27	0,51	0,39	68
<i>Guatteria australis</i>	0,18	0,45	0,56	0,40	64	0,39	0,43	1,03	0,61	45
<i>Hymatanthus phagedaenicus</i>	0,37	0,25	0,56	0,39	65	0,39	0,06	0,51	0,32	77
<i>Palicourea guianensis</i>	0,37	0,25	0,56	0,39	66	0,19	0,33	0,51	0,35	74
<i>Qualea jundiahy</i>	0,18	0,43	0,56	0,39	67	0,19	0,34	0,51	0,35	72
<i>Tibouchina granulosa</i>	0,18	0,41	0,56	0,38	68	0,19	0,65	0,51	0,45	61
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	0,18	0,40	0,56	0,38	69	0,19	0,50	0,51	0,40	66
<i>Psychotria carthagenensis</i>	0,37	0,17	0,56	0,37	70	0,19	0,07	0,51	0,26	91
<i>Alchornea triplinervia</i>	0,18	0,32	0,56	0,36	71	0,19	0,31	0,51	0,34	75
<i>Siparuna reginae</i>	0,18	0,32	0,56	0,35	72	0,19	0,25	0,51	0,32	78
<i>Guatteria nigrescens</i>	0,37	0,13	0,56	0,35	73	0,19	0,03	0,51	0,25	110
<i>Lamanonia ternata</i>	0,37	0,12	0,56	0,35	74	0,19	0,14	0,51	0,28	84
<i>Alchornea iricurana</i>	0,37	0,09	0,56	0,34	75	0,78	0,37	1,54	0,90	33
<i>Tabernaemontana fuchsiaefolia</i>	0,18	0,26	0,56	0,34	76	0,19	0,00	0,51	0,24	118
<i>Rheedia gardneriana</i>	0,37	0,07	0,56	0,33	77	-	-	-	-	-
<i>Psychotria axilaris</i>	0,37	0,05	0,56	0,33	78	0,19	0,04	0,51	0,25	94
<i>Guarea pendula</i>	0,37	0,05	0,56	0,33	79	0,39	0,09	1,03	0,50	54
<i>Eugenia leptoclada</i>	0,37	0,05	0,56	0,33	80	0,78	0,12	1,54	0,81	35
<i>Myrciaria sp.</i>	0,37	0,04	0,56	0,32	81	0,19	0,03	0,51	0,25	107
<i>Miconia candolleana</i>	0,18	0,21	0,56	0,32	82	0,19	0,18	0,51	0,30	80
<i>Vernonia diffusa</i>	0,18	0,16	0,56	0,30	83	0,39	0,45	0,51	0,45	62
<i>Lonchocarpus muehlbergianus</i>	0,18	0,13	0,56	0,29	84	-	-	-	-	-
<i>Mollinedia micrantha</i>	0,18	0,12	0,56	0,29	85	0,19	0,03	0,51	0,25	101
<i>Cariniana estrellensis</i>	0,18	0,12	0,56	0,29	86	-	-	-	-	-
<i>Matayba elaeagnoides</i>	0,18	0,10	0,56	0,28	87	0,39	0,63	1,03	0,68	42
<i>Stryphnodendron guianensis</i>	0,18	0,09	0,56	0,28	88	0,19	0,09	0,51	0,26	86
<i>Hortia arborea</i>	0,18	0,08	0,56	0,27	89	0,39	0,72	0,51	0,54	49
<i>Bauhinia forficata</i>	0,18	0,07	0,56	0,27	90	0,19	0,07	0,51	0,26	90
<i>Xylosma sp.</i>	0,18	0,04	0,56	0,26	91	0,39	0,29	0,51	0,40	67
<i>Sparattosperma leucanthum</i>	0,18	0,04	0,56	0,26	92	0,19	0,03	0,51	0,25	111
<i>Trichilia clausseunii</i>	0,18	0,03	0,56	0,26	93	0,19	0,04	0,51	0,25	96
<i>Prockia sp.</i>	0,18	0,03	0,56	0,26	94	-	-	-	-	-
<i>Indeterminada 27</i>	0,18	0,03	0,56	0,26	95	0,39	0,01	1,03	0,48	60
<i>Phyllostemonodaphne geminiflora</i>	0,18	0,03	0,56	0,26	96	-	-	-	-	-
<i>Ceiba speciosa</i>	0,18	0,03	0,56	0,26	97	-	-	-	-	-
<i>Indeterminada 01</i>	0,18	0,03	0,56	0,26	98	0,19	0,01	0,51	0,24	117
<i>Swartzia elegans</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	99	0,19	0,01	0,51	0,24	115
<i>Zanthoxylum riedelianum</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	100	0,19	0,01	0,51	0,24	116
<i>Miconia sellowiana</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	101	-	-	-	-	-
<i>Siparuna guianensis</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	102	0,19	0,03	0,51	0,25	106
<i>Indeterminada 33</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	103	-	-	-	-	-
<i>Maytenus aquifolium</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	104	0,39	0,08	1,03	0,50	55
<i>Anadenanthera colubrina</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	105	-	-	-	-	-
<i>Nectandra cf. saligna</i>	0,18	0,02	0,56	0,26	106	-	-	-	-	-
<i>Piper arboreum</i>	0,18	0,02	0,56	0,25	107	0,19	0,14	0,51	0,28	85
<i>Maprounea guianensis</i>	0,18	0,02	0,56	0,25	108	-	-	-	-	-

Tabela 4 – Continua...

Nome Científico	Estrutura Horizontal Observada					Estrutura Horizontal Estimada				
	DR	DoR	FR	IVI	Ranking de IVI	DR	DoR	FR	IVI	Ranking de IVI
<i>Coussarea verticilata</i>	0,18	0,02	0,56	0,25	109	0,19	0,04	0,51	0,25	95
<i>Andira fraxinifolia</i>	0,18	0,02	0,56	0,25	110	0,19	0,03	0,51	0,25	108
<i>Psychotria sp.</i>	0,18	0,02	0,56	0,25	111	0,19	0,04	0,51	0,25	98
<i>Lauraceae 3</i>	0,18	0,02	0,56	0,25	112	0,19	0,04	0,51	0,25	99
<i>Miconia sp.</i>	-	-	-	-	-	0,58	0,12	1,54	0,75	39
<i>Croton urucurana</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,99	0,51	0,57	47
<i>Myrcia sp.</i>	-	-	-	-	-	0,39	0,07	1,03	0,49	58
<i>Cassia ferruginea</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,63	0,51	0,44	63
<i>Psychotria sessilis</i>	-	-	-	-	-	0,39	0,08	0,51	0,33	76
<i>Solanum leucodendron</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,16	0,51	0,29	81
<i>Indeterminada 15</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,15	0,51	0,28	82
<i>Acacia polyphila</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,08	0,51	0,26	87
<i>Nectandra rigida</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,08	0,51	0,26	88
<i>Tapirira guianensis</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,08	0,51	0,26	89
<i>Alchornea glandulosa</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,04	0,51	0,25	93
<i>Guatteria sp.</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	100
<i>Remijia sp.</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	102
<i>Xylopia sericea</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	103
<i>Tovomita glazioviana</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	104
<i>Machaerium aculeatum</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	105
<i>Inga sp.</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	109
<i>Rudgea lanceolata</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,03	0,51	0,25	112
<i>Indeterminada 12</i>	-	-	-	-	-	0,19	0,02	0,51	0,24	114
<i>Total</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>-</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>-</i>

“-“ indica ausência da espécie na listagem, sendo atribuído o valor “zero” para cada espécie para cálculo do teste F de Graybill (1976); DR é a densidade relativa, DoR é a dominância relativa, FR é a frequência relativa e IVI é o índice de valor de importância das espécies.

O modelo em nível de árvore individual mostrou-se preciso na estimação do volume por unidade de área, distribuição diamétrica e de altura e em nível de árvore individual para a Floresta em estudo. Do ponto de vista prático, este modelo confere maior versatilidade no planejamento da produção, uma vez que se pode estimar o volume de madeira para diferentes usos, haja vista que se tem a projeção das dimensões árvore a árvore, inclusive do fuste comercial (uso mais nobre).

Os resultados encontrados confirmam o potencial de utilização de modelos em nível de árvore individual em florestas naturais estruturalmente complexas, como é o caso da Floresta Estacional Semidecidual Montana em estágio médio de sucessão ecológica.

4. CONCLUSÕES

Com este estudo pode-se concluir que:

- O modelo de árvore individual avaliado é eficiente para estudo do crescimento e da produção da Floresta Estacional Semidecidual.
- As estimativas foram precisas em todos os níveis de detalhamento: em nível de povoamento total, distribuição diamétrica e altura, e em nível de árvore individual.
- Novas investigações devem ser realizadas na tentativa de aprimorar o sub-modelo de ingresso, sendo necessário, portanto, a coleta de informações da regeneração das florestas (menores níveis de inclusão nos inventários florestais).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, J.E.; PIZATTO, W.; SANQUETTA, C.R.; WENDLING, J.L.G.; MAESTRI, R. Utilização das matrizes de transição na avaliação e simulação precoces do crescimento de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Floresta**, v.27, n.1/2, p.83-98, 2001.

AUSTREGÉSILO, S.L.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, J.A.A.; SOUZA, A.L.; MEUNIER, I.M.J.; SANTOS, E.S. Comparação de métodos de prognose da estrutura diamétrica de uma floresta estacional semidecidual secundária. **Revista Árvore**, v.28, n.2, p.227-232, 2004.

AZEVEDO, C.P.; SOUZA, A.L.; JESUS, R.M. Um modelo de matriz de transição para prognose do crescimento de um povoamento natural remanescente não manejado de mata atlântica. **Revista Árvore**, v.19, n.2 p.187-199, 1995.

CETEC. **Determinação de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas do estado de Minas Gerais e outras regiões do País**. Belo Horizonte - MG: Fapemig / CETEC, 1995. 295 p. (Relatório Final).

DAVIS, L.S.; JOHNSON, K.N. **Forest management**. New York: McGraw-Hill, 3. ed., 1987. 790 p.

FREITAS, J.V.; HIGUCHI, N. Projeções da distribuição diamétrica de uma floresta tropical úmida de terra firme pela cadeia de Markov. In: Congresso florestal panamericano, Curitiba. Floresta para o Desenvolvimento: Política, Ambiente, Tecnologia e Mercado. **Anais...** São Paulo, v.2, p.545- 548, 1993.

GANDOLFI, S.; LEITÃO FILHO, H.F.; BEZERRA, C.L. Levantamento florístico e caráter sucessionial de espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta Mesófila Semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Revista Brasileira de Biologia**, v.55, n.4, p.753-767, 1995.

GRAYBILL, F.A. **Theory and application of linear model**. s.l.: Belmont Duxbury, 1976. 704 p.

HASENAUER, H. Princípios para a modelagem de ecossistemas florestais. **Ciência & Ambiente**, n.20, p.53-69, 2000.

MENON, U.M.; FIGUEIREDO FILHO, A.; WATZLAWICK, L.F. Matriz de transição para predição da distribuição diamétrica em Floresta Ombrófila Mista na flona de Irati (PR). **Ambiência**, v.6, n.2, p.271-280, 2010.

MMA - **Ministério do Meio Ambiente**, Brasil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>> Acesso em: 13 de fev. 2012.

MONSERUD, R.A.; STERBA, H. Modeling individual tree mortality for Australian forest species. **Forest ecology and Management**, v.113, n.2, p.109-123, 1999.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKÝ, J. The single tree-based stand simulator Silva: construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**, v.162, n.1, p.3-21, 2002.

PULZ, F.A. **Estudo da dinâmica e a modelagem da estrutura diamétrica de uma floresta semidecídua montana na região de Lavras - MG**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

PULZ, F.A.; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA FILHO, A.T. Acuracidade da predição da distribuição diamétrica de uma floresta inequiana com a matriz de transição. **Revista Cerne**, v.5, n.1 p. -14, 1999.

ROSSI, L.M.B.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Revista Floresta**, v.37, n.2, p.275-291, 2007.

SANQUETTA, C.R.; BRENA, D.A.; ÂNGELO, H.; MENDES, J.B. Matriz de transição para simulação da dinâmica de florestas naturais sob diferentes intensidades de corte. **Ciência Florestal**, v.6, n.1, p.65-78, 1996.

SCOLFORO, J.R.S.; PULZ, F.A.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA FILHO, A.T. Modelo de produção para floresta nativa como base para o manejo sustentado. **Revista Cerne**, v.2, n.1, p.112-137, 1996.

SHIMIZU, J.Y. Estratégia complementar para conservação de espécies florestais nativas: resgate e conservação de ecótipos ameaçados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.54, p.7-35, 2007.

SILVA, J.N.M.; LOPES, J.C.A. **Inventário florestal contínuo em florestas tropicais**: a metodologia utilizada pela Embrapa-Cpatu na Amazônia brasileira. Belém- PA: Embrapa-CPATU, 1984, 36 p. (Documentos 36).

SOARES, C.P.B.; NETO, F.P.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV. 2011. 272 p.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**: The principles and practice of statistics in biological research. San Francisco: Freeman and Company. 1969. 776 p.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Mata Atlântica**. Disponível em: <<http://www.sosmatatlantica.org.br>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

STEPKA, T.F.; DIAS, A.N.; FILHO, A.F.; MACHADO, S.A.; SAWCZUK, A.R. Prognose da estrutura diamétrica de uma Floresta Ombrófila Mista com os métodos razão de movimentos e matriz de transição. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, n.64, p.327-335, 2010.

TAYLOR, S.L.; MACLEAN, D.A. Spatiotemporal patterns of mortality in declining balsam fir and spruce stands. **Forest Ecology and Management**, v.253, n.1, p.188-201, 2007.

TEIXEIRA, L.M.; CHAMBERS, J.Q.; SILVA, A.R.; LIMA, A.J.N.; CARNEIRO, V.M.C.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Projeção da dinâmica da floresta natural de Terra-firme, região de Manaus-AM, com o uso da cadeia de transição probabilística de Markov. **Acta Amazônica**, v.37, n.3, p.377-384, 2007.

TOMÉ, M. Os modelos de produção florestal na gestão de povoamentos florestais. **Revista Agros**, v.8, n.2, p.32-36, 1991.

VANCLAY, J.K. **Modeling Forest growth and yield: applications to mixed tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312 p.

APÊNDICE 1

Rotina de simulação do modelo de crescimento em nível de árvore individual

- 1) *Foram definidas no ano de 1994, as árvores que seriam excluídas da listagem (mortas) no intervalo 1994-1997 ($Pa < PM$ do ano de 1994). Este procedimento foi realizado 30 vezes e foi selecionada a amostra que mais se aproximou do valor médio das repetições;*
 - 2) *Projeção do diâmetro, altura total e altura do fuste das árvores sobreviventes para o ano 1997, utilizando as variáveis de entrada observadas no ano de 1994;*
 - 3) *Inclusão na listagem do ano de 1997, das árvores ingressas no intervalo 1994-1997. A taxa periódica média de ingresso foi de 6,3 % (todos os ingressos apresentavam DAP igual a 5,92 cm, altura do fuste igual a 4,47 m e altura total igual a 7,42 m, iguais aos valores médios das árvores ingressas. Os valores de nível de infestação por cipó e nível de qualidade da copa foram iguais a "1" e o nível de iluminação da copa, igual a "3";*
 - 4) *Distribuição aleatória das árvores ingressadas entre as parcelas e definição aleatória das coordenadas x (entre 0 e 20m) e y (entre 0 e 50m) para cada árvore;*
 - 5) *Cálculo das distâncias entre as árvores qualificadas como vizinhas no ano de 1997;*
 - 6) *Cálculo dos índices de competição no ano de 1997;*
 - 7) *Estimação da probabilidade de mortalidade (PM) para cada árvore no ano de 1997;*
 - 8) *Definição, no ano de 1997, das árvores que serão mortas no intervalo 1997-2000 ($Pa < PM$ do ano de 1997);*
 - 9) *Projeção do diâmetro, altura total e altura do fuste das árvores sobreviventes para o ano 2000, utilizando as variáveis de entrada no ano de 1997(projetadas);*
 - 10) *Inclusão na listagem do ano de 2000, das árvores ingressas no intervalo 1997-2000.*
 - 11) *Distribuição aleatória das árvores ingressadas entre as parcelas e definição aleatória das coordenadas x (entre 0 e 20m) e y (entre 0 e 50m) para cada árvore;*
 - 12) *Cálculo das distâncias entre as árvores qualificadas como vizinhas no ano de 2000;*
 - 13) *Cálculo dos índices de competição no ano de 2000;*
- E assim sucessivamente para os intervalos 2000-2004 e 2004-2008.

CONCLUSÕES GERAIS

- Os resultados do capítulo I permitem concluir que existe correlação significativa entre índices de competição e o crescimento e a mortalidade de árvores no fragmento florestal estudado, com maiores correlações entre os índices semi-independentes da distância, utilizando raios competitivos de seis metros. Recomenda-se que sejam realizadas investigações referentes a índices de competição que relacionam conceitos de competição intra-específica e interespecífica, pois poderia aumentar sobremaneira o entendimento da competição entre árvores em florestas inequiâneas.

- Com os resultados do capítulo II pode-se concluir que as redes neurais artificiais podem ser utilizadas com eficiência para estimar a mortalidade de árvores individuais em florestas inequiâneas. Foram obtidas estimativas precisas com o emprego de redes para aproximação de funções (estimativa da probabilidade de mortalidade). Também, se sugere investigar a aplicação de redes neurais para classificação de padrões, que não foram satisfatórias neste estudo, em áreas com um maior volume de dados de mortalidade, visto a potencialidade dessas redes na estimativa da mortalidade regular.

- Os resultados do capítulo III também demonstraram eficiência das redes neurais artificiais para projetar o crescimento de árvores, sendo obtida uma única rede para projetar simultaneamente as variáveis *dap*, altura total e altura do fuste.

- Os resultados do capítulo IV comprovam a eficiência do uso do modelo de árvore individual desenvolvido nesta tese após a sua aplicação em dados independentes. As estimativas foram precisas e consistentes em todos os níveis de detalhamento: em nível de povoamento total, distribuição diamétrica e altura, e em nível de árvore individual. No entanto, novas investigações devem ser realizadas na tentativa de aprimorar o sub-modelo de ingresso, sendo necessário, portanto, a coleta de informações da regeneração das florestas (menores níveis de inclusão nos inventários florestais).