



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

MODELAGEM DA ALTURA, VOLUME E AFILAMENTO DO FUSTE DE *Calycophyllum spruceanum* Benth. EMPREGANDO REGRESSÃO E REDES NEURAS ARTIFICIAIS

BRENO HENRIQUE PEDROSO DE ARAÚJO

Manaus, Amazonas

Maio, 2015

BRENO HENRIQUE PEDROSO DE ARAÚJO

MODELAGEM DA ALTURA, VOLUME E AFILAMENTO DO FUSTE DE *Calycophyllum spruceanum* Benth. EMPREGANDO REGRESSÃO E REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Orientação:

Dr. Henrique Eduardo Mendonça Nascimento

Dr. Marcelino Carneiro Guedes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

Manaus, Amazonas

Maio, 2015



Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
 Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

DEFESA PÚBLICA DISSERTAÇÃO / PPG-CFT - INPA

Ata da Defesa Pública da Dissertação de Mestrado de BRENO HENRIQUE PEDROSO DE ARAUJO aluno (a) do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS, realizada no dia 9 de abril de 2015.

Aos 9 dias do mês de abril de 2015, às 09h00min, na Sala de Aula do Programa de PG em Ciências de Florestas Tropicais, PPG-CFT, Campus III, INPA-VB, realizou-se a Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "MODELAGEM DA ALTURA, VOLUME E AFILAMENTO DO FUSTE DE CALYCOPHYLLUM SPRUCEANUM BENTH. EMPREGANDO REGRESSÃO E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS" em conformidade com o Artigo 68 do Regimento Interno do PPG-CFT e Artigo 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI-INPA) como parte final de seu trabalho para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS. A Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes professores doutores: ULISSES SILVA DA CUNHA (UFAM), ALBERTO CARLOS MARTINS PINTO (UFAM) e ADRIANO JOSÉ NOGUEIRA LIMA (INPA). O (a) Presidente da Banca Examinadora, Dr. Henrique Eduardo Mendonça Nascimento (orientador (a)-INPA), deu início à sessão convidando os senhores membros e o (a) Mestrando (a) a tomarem seus lugares e informou sobre os procedimentos a serem observados para o prosseguimento do exame. A palavra foi, então, facultada ao (à) Mestrando (a) que apresentou uma síntese do seu estudo e respondeu às perguntas formuladas pelos membros da Banca Examinadora. Depois da apresentação e arguição, a referida Banca Examinadora se reuniu e decidiu por

APROVADO

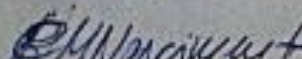
A sessão foi encerrada às 11h15 e, para constar eu, Valdecira Azevedo, Secretária do PPG-CFT lavrei a presente Ata, que depois de lida e aprovada foi assinada pelo Presidente e membros da Banca Examinadora. Em Manaus (AM), 9 de abril de 2015.

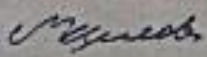
Banca Examinadora:

Prof. Dr. : ULISSES SILVA DA CUNHA

Prof. Dr. : ALBERTO CARLOS MARTINS PINTO

Prof. Dr. ADRIANO JOSÉ NOGUEIRA LIMA


 Dr. Henrique Eduardo M. Nascimento
 (Presidente da Banca)


 Dr. Marcelino Carneiro Guedes
 Co-orientador (a) do PPG-CFT


 Dr. José Francisco de C. Gonçalves
 Coordenador(a) do PPG-CFT

PPG CFT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
 CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS



Av. André Araújo, 2108 - Adufo
 CEP: 67.040-970 - Manaus, AM, Brasil
 Fone/Fax: (51) 3522-0443 / 3544
 www.cft.inpa.gov.br - e-mail: cft@inpa.gov.br



A663 Araújo, Breno Henrique Pedroso de
Modelagem da altura, volume e afilamento do fuste de
Calycophyllum Spruceanum Benth. empregando regressão e redes
neurais artificiais / Breno Henrique Pedroso de Araújo. --- Manaus:
[s.n.], 2015.
53 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) --- INPA, Manaus, 2015.
Orientador : Henrique Eduardo Mendonça Nascimento.
Área de concentração : Ciências de Florestas Tropicais.

1. Florestas alagáveis. 2. Inteligência artificial. 3. Manejo e
mensuração Florestal. Pau-mulato I. Título.

CDD 634.928

Sinopse: Estimativas de altura total, volume e afilamento do fuste foram obtidas por meio de análise de regressão e redes neurais artificiais para *Calycophyllum spruceanum* Benth. em florestas de várzea do estuário amazônico.

Palavras-chave: Florestas alagáveis, Inteligência artificial, Manejo e mensuração florestal, Pau-mulato.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, determinação, força e coragem para enfrentar os desafios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante o período do mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais e seus professores pela estrutura oferecida, pela oportunidade aprender e cursar o mestrado nesta instituição que é referência em pesquisas.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amapá) pelo apoio técnico e logístico, crucial para a coleta de dados desta pesquisa. Aos integrantes do projeto “Ecologia e Manejo Florestal para Uso Múltiplo de Várzeas do Estuário Amazônico (FLORESTAM)” da Embrapa Amapá que sempre estiveram dispostos a auxiliar nas atividades de campo.

Ao meu orientador Dr. Henrique Eduardo Mendonça Nascimento, pessoa simples e acessível que sempre esteve à disposição para ajudar, direcionar, corrigir, orientar e repassar alguns conhecimentos que me ajudaram a desenvolver o senso crítico. Ao meu co-orientador Dr. Marcelino Carneiro Guedes, pela orientação, ensinamentos, paciência, motivação, incentivo e por ajudar a enfrentar desafios e crescer de forma ética e profissional.

Ao professor Dr. Hélio Garcia Leite (HGL) da Universidade Federal de Viçosa, uma das pessoas mais incríveis que conheço. Um exemplo de profissional, humilde, solícito e que esteve sempre disposto a ajudar com suas ideias desafiadoras e inovadoras.

Ao Dr. Daniel Binoti da DAP Engenharia Florestal Ltda. por me dar suporte em algumas análises referentes a Redes Neurais Artificiais e a Pablo Lopes por me dar oportunidade de participar de treinamento na DAP Engenharia Florestal Ltda, em Viçosa-MG.

Aos moradores de Mazagão-AP (Valdenor e Milton) e Ilha das Cinzas-PA (Milton) que sempre nos receberam de braços abertos em suas casas e possibilitaram a realização do trabalho em suas áreas.

“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar, é melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver”.

(Martin Luther King)

RESUMO

As várzeas estuarinas são ecossistemas ripários que estão associados a rios de águas brancas, com grande aporte de água doce e sedimentos decorrentes do ciclo diário de enchentes e vazantes representados pelas marés. Nestes ecossistemas ainda são poucos os planos de manejo aprovados, principalmente em virtude da falta de regularização fundiária das áreas. Além disso, existe a necessidade de estudos e métodos que viabilizem o manejo adequado desse ecossistema de modo a promover seu sustento e uso racional dos recursos. Geralmente as estimativas de altura, volume e afilamento do fuste das árvores são obtidas por meio de regressão linear e não linear. Como alternativa, a inteligência artificial é uma ferramenta promissora que vem sendo utilizada com êxito no segmento florestal, auxiliando na tomada de decisão. Este estudo teve o objetivo de ajustar, por meio de análise de regressão e redes neurais artificiais, equações hipsométricas, volumétricas e de afilamento para *Calycophyllum spruceanum*, espécie abundante em florestas secundárias no estuário amazônico. Foram cubadas 695 árvores da espécie em quatro povoamentos com idades de 60, 72 e 120 meses, nos municípios de Gurupá-Pará e Mazagão-Amapá. Por meio de regressão foram ajustados modelos hipsométricos, volumétricos e de afilamento considerando todos os dados e estratificados por idade do povoamento, posteriormente foram aplicados testes de identidade de modelos para verificar a possibilidade de redução do número de equações para volume, altura e afilamento. Foram treinadas 100 redes neurais artificiais para estimativas de altura, volume e afilamento do fuste utilizando o algoritmo Resilient Propagation e oito neurônios na camada intermediária. Para altura total, os três modelos testados por regressão (Exponencial, Gompertz e Logística) resultaram em boas estimativas. O modelo não-linear de Schumacher e Hall gerou estimativas de volume sem tendenciosidade. O modelo de Garay foi o que apresentou melhor precisão para estimar afilamento do fuste da espécie. Embora não se tenha verificado diferenças discrepantes na precisão dos modelos, considerando todos os dados em relação aos modelos estratificados por idade, o teste de identidade permitiu inferir que é mais adequado levar a idade em consideração nos ajustes. Com base nas medidas de precisão e dispersão de resíduos foi possível verificar que as estimativas geradas pelas redes são tão eficientes quanto as dos modelos de regressão.

Palavras-chave: Florestas alagáveis, Inteligência artificial, Manejo e mensuração florestal, Pau-mulato.

ABSTRACT

The estuarine wetlands are riparian ecosystems that are associated with white-water rivers, with large input of sediment from the daily cycle of flood and ebb of the tides. In these ecosystem are few approved management plans have been approved, mainly due to the lack of legalization ownership. In addition, there is a need for studies and methods of enabling the proper management of this ecosystem in order to promote their livelihoods and rational use of resources. In general, height, volume and taper estimates are obtained by linear and non-linear regression. Alternatively, the artificial intelligence is a promising tool that has been used successfully in the forestry sector, assisting the decision-making. This study aimed to adjust, through regression analysis and artificial neural networks, hypsometric equations, volumetric and tapering to *Calycophyllum spruceanum*, an abundant tree species in secondary forests in the Amazon várzea estuary. We randomly selected 695 trees of the species in four stands with 60, 72 and 120 months ages located in the municipalities of Gurupá, Pará state and Mazagão, Amapá state. Hypsometric, volumetric and taper were adjusted considering all data and population stratified by age, and identity tests were then applied to verify the possibility of reducing the number of equations for the volume, height and taper. One-hundred artificial neural networks were trained for height, volume and taper using the Resilient Propagation algorithm with eight neurons for the hidden layer. For the total height, the three models tested by regression (Exponential, Gompertz and Logistic) resulted in high precision estimates. The nonlinear model of Schumacher and Hall generated without bias precise volume estimates. The Garay model showed the best precision to estimate the species taper shaft. Although we did not find any differences in the precision of the models, considering all the data from the models stratified by age, identity testing also has shown that it is more appropriate to take into account the ages. Based on the precision parameters and residual distributions our results demonstrate that the estimates generated by the artificial neural networks are as efficient as the regression models.

Keywords: Floodplains forests, Artificial intelligence, Forest management and measurement, Pau-mulato.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
INTRODUÇÃO GERAL	10
CAPÍTULO 1	13
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	14
INTRODUÇÃO	15
MATERIAL E MÉTODOS	18
<i>Descrição da espécie</i>	<i>18</i>
<i>Áreas de estudo</i>	<i>19</i>
<i>Coleta de dados.....</i>	<i>20</i>
<i>Modelos de regressão para as estimativas de altura, volume e afilamento do fuste</i>	<i>21</i>
<i>Teste de identidade dos modelos.....</i>	<i>22</i>
<i>Redes Neurais Artificiais para estimativas de altura, volume e afilamento do fuste.....</i>	<i>23</i>
<i>Crêterios estatísticos para avaliação dos modelos e das RNA</i>	<i>24</i>
RESULTADOS	25
<i>Altura total</i>	<i>25</i>
<i>Volume</i>	<i>28</i>
<i>Afilamento do fuste.....</i>	<i>31</i>
DISCUSSÃO.....	34
CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS.....	39
APÊNDICES	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das quatro áreas de estudo situadas em florestas de várzea estuarina nos estados do Amapá e Pará.	20
Figura 2. Curvas hipsométricas ajustadas para o <i>C. spruceanum</i> , em nível geral e estratificadas por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.	26
Figura 3. Curvas hipsométricas das redes neurais ajustadas para o <i>C. spruceanum</i> em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.	28
Figura 4. Valores observados e estimados de volume pelo modelo de Schumacher para o <i>C. spruceanum</i> , em nível geral e estratificadas por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.	29
Figura 5. Valores observados e estimados de volume pelas redes neurais para o <i>C. spruceanum</i> , em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.	30
Figura 6. Dispersão dos dados de d/dap observados e estimados pelo modelo de garay (eixo x) em função de h/ht (eixo y) para o <i>C. spruceanum</i> (pontos vermelhos são dados observados e pontos pretos são dados estimados).	32
Figura 7. Dispersão dos dados de d/dap observados e estimados pelas RNA (eixo x) em função de h/ht (eixo y) para o <i>C. spruceanum</i> (pontos vermelhos são dados observados e pontos pretos são dados estimados).	33

INTRODUÇÃO GERAL

Dentro da perspectiva do uso sustentável dos produtos florestais, o manejo florestal na Amazônia é atualmente concebido como a forma mais lógica de combater o desmatamento e promover a geração de renda para as populações locais. Para tal, a extração dos produtos florestais madeireiros e não madeireiros a partir do manejo florestal necessita ser economicamente competitivo comparativamente às atividades predatórias. As técnicas de manejo tendem a aumentar a competitividade da atividade florestal, pois permitem promover a eficiência do uso dos recursos por meio de maior produtividade do trabalho e a redução de desperdícios (Barreto et al., 1998). No caso das florestas sazonalmente inundadas pela cheia e vazante dos rios de água branca ao longo do ano na Amazônia, denominadas de várzea (Prance, 1979), ainda são poucos planos de manejo aprovados, principalmente em virtude da falta de regularização fundiária das propriedades rurais e ausência de legislação específica para este ambiente. Além disso, há urgente necessidade de estudos para fomentar novos métodos que resultem no manejo adequado desse ecossistema. Nesse sentido, manejar de forma eficiente esses recursos requer a utilização de métodos de inventário e exploração mais eficazes e menos onerosos.

Particularmente, as várzeas estuarinas são ecossistemas ripários, com grande aporte de água doce e sedimentos decorrentes do ciclo diário de enchentes e vazantes representados pelas marés, como também pelo ciclo sazonal anual das cheias e vazantes dos rios (Veríssimo et al., 1999). Devido às inundações, grande quantidade de material sedimentar é carregada diariamente para essas áreas, o que lhe confere elevada fertilidade (Wittman et al., 2004) e, como consequência, alta produtividade e suporte às populações ribeirinhas que se mantêm dos recursos disponíveis nesse ecossistema (Silva et al., 2006). As várzeas se destacam por apresentar uma vegetação característica com espécies exclusivas e adaptadas ao regime de inundação diário (Parolin et al., 2004). As adaptações anatômicas, fisiológicas e morfológicas das espécies de árvores às inundações são expressas de diversas formas, tais como o aumento da porosidade das raízes, liberação de substâncias tóxicas voláteis para a atmosfera, desenvolvimento de raízes adventícias, formação de aerênquima no córtex da raiz, incorporação de suberina na exoderme da raiz, enriquecimento da rizosfera com oxigênio, redução da atividade fotossintética, metabolismo anaeróbico, etc. (De Simone et al., 2003; Ferreira et al., 2010; Parolin, 2012; Silva et al., 2012; Piedade et al., 2013). As variações dos ciclos sazonais diários e anuais relacionadas à altura e o tempo de inundação, influenciam

significativamente a diversidade e a composição florística (Ter-Steege et al., 2000; Wittmann et al., 2004, 2006).

As florestas de várzea representam a segunda maior fitofisionomia da bacia amazônica, ocupando uma superfície de aproximadamente 100.000 km² (Junk, 1997). O estado do Amapá possui uma área de 142.828,52 Km² (IBGE, 2013), com as florestas de várzea perfazendo 6.959,25 km² (4,9%) do território (Rabelo et al., 2008). Em função da alta fertilidade, as várzeas estuarinas são altamente favoráveis à agricultura aliada à exploração seletiva de madeira com a utilização de métodos tradicionais, sem utilização de máquinas pesadas e poucos danos aos solos (D' Oliveira, 1989). Nas florestas de várzea estuarina do Amapá é notória a importância socioeconômica da espécie arbórea conhecida popularmente como pau-mulato (*Calycophyllum spruceanum* Benth.). Esta espécie representa cerca de 20% da receita bruta anual advinda do comércio de madeira de várzea dos municípios de Macapá e Santana, cidades que concentram em torno de 90% da população do Amapá (Guedes et al., 2012; Castilho, 2013), e com isso coloca-se entre as cinco espécies mais exploradas pelos ribeirinhos (Queiroz e Machado, 2007). A extração da espécie é advinda principalmente de pequenas áreas de agricultura itinerante abandonadas que se tornam florestas secundárias. Para preparo do roçado, as áreas geralmente são queimadas, favorecendo a quebra de dormência das sementes com elevada regeneração natural de pau-mulato, em contraste com a sua baixa densidade natural encontrada em florestas naturais (Castilho, 2013).

Em decorrência da potencialidade da espécie no estado, do desenvolvimento do setor florestal e do aumento da demanda de mercado por produtos madeireiros, torna-se imprescindível um diagnóstico mais preciso da produção por meio da utilização de técnicas adequadas de inventário e manejo florestal. O desenvolvimento e aplicação de métodos quantitativos tanto para comunidades florestais como para espécies madeiráveis são essenciais para elaboração criteriosa de planos de ação visando a garantia sustentável de recursos no médio e longo prazos (Lima et al., 2014). Desta forma, ajustes de equações volumétricas, de altura e de afilamento do fuste com alta precisão se fazem necessários. O volume de madeira é uma das informações de maior relevância para o melhor entendimento dos atributos de um povoamento florestal, fornecendo elementos para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas. Esta variável não é facilmente mensurável, portanto, utilizam-se equações matemáticas para estimar o volume individual das árvores da população de interesse (Silva et al., 2011).

Novas ferramentas têm sido introduzidas na ciência florestal com o intuito de aumentar a precisão das estimativas e diminuir os custos e entre elas se destacam os modelos

de Redes Neurais Artificiais (RNA) (Silva et al., 2009; Gorgens et al., 2009; Leite et al., 2011) que tem se mostrado uma alternativa promissora em relação aos métodos convencionais de regressão para ajustes de equações (Ceylan 2008). As RNA podem ser aplicadas para estimação de altura, volume, afilamento, crescimento e produção, dentre outras aplicações. As RNA tem sido usadas em outras áreas do conhecimento, especialmente muitas aplicações de engenharia para a previsão, otimização, classificação e processamento de dados (Canakci et al., 2012; Tiryaki e Hamzacebi, 2014).

Já existem alguns *softwares* que foram desenvolvidos especificamente para a utilização de RNA no manejo e mensuração florestal. O primeiro desta série de aplicativos desenvolvidos foi o *NeuroForest*, que contém ampla variedade de opções para simulação de redes neurais artificiais, tais como os dispositivos de solução de problemas, permitindo a total liberdade para a seleção de centenas de tipologias. O *NeuroForest* já está sendo utilizado em escala operacional em mais de 500 mil hectares de florestas plantadas e gerou uma redução de custo de aproximadamente 25% para atividade de coleta de dados de parcelas de inventário florestal. Algumas grandes empresas que já estão utilizando este sistema em escala operacional são a Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), VERACEL, EUDORADO, DURATEX, QUEIROZ GALVÃO e SINOBRAS (Celulose Online, 2015).

Esta dissertação faz parte das atividades do Projeto “Ecologia e Manejo Florestal para Uso Múltiplo de Várzeas do Estuário Amazônico” (FLORESTAM). O projeto é liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amapá) e conta com a colaboração de outras instituições (Instituto Estadual de Florestas do Amapá (IEF/AP), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Universidade do Estado do Amapá (UEAP)). O Florestam tem como meta ampliar os conhecimentos sobre o ecossistema de várzea e a partir disso, promover soluções e inovações para o manejo florestal sustentável e o uso múltiplo das espécies nativas das várzeas do estuário do rio Amazonas.

CAPÍTULO 1

Araújo, B. H. P.; Nascimento, H. E. M.; Leite, H. G.; Binoti, D. H. B.; Guedes, M. C. 2015. Modelagem da altura, volume e afileamento do fuste de *Calycophyllum spruceanum* Benth. empregando regressão e redes neurais artificiais.

Revista: Acta Amazonica

RESUMO

A inteligência artificial é uma ferramenta que vem sendo utilizada com êxito no campo da mensuração e manejo florestal, dando suporte a tomada de decisão. Este estudo teve o objetivo de ajustar, por meio de análises de regressão e redes neurais artificiais, modelos hipsométricos, volumétricos e de afilamento para *Calycophyllum spruceanum* Benth., espécie arbórea abundante em florestas secundárias de várzea no estuário amazônico. Foram cubadas 695 árvores da espécie em quatro povoamentos com idades entre 60, 72 e 120 meses, nos municípios de Gurupá-Pará e Mazagão-Amapá. Para os ajustes por regressão foi feito um teste de identidade de modelos para verificar a possibilidade de redução do número de equações. Foram treinadas 100 redes neurais artificiais para estimativas de altura, volume e afilamento do fuste utilizando o algoritmo *resilient propagation*. Com base nas medidas de precisão e dispersão de resíduos foi possível verificar que as estimativas geradas pelas redes são tão eficientes quanto as dos modelos de regressão.

Palavras-chave: Florestas alagáveis, Inteligência artificial, Manejo e mensuração florestal, Pau-mulato.

ABSTRACT

Artificial intelligence is a promising tool that has been used successfully in the field of forest management in order to support decision-making. This study aimed to adjust, through regression analysis and artificial neural networks, hypsometric, volumetric and taper models to *Calycophyllum spruceanum* Benth., an abundant tree species in secondary forests in the Amazon várzea estuary. We randomly selected 695 trees of the species in four stands aged 60, 72 and 120 months in four várzea sites in the municipalities of Gurupá, Pará State and Mazagão, Amapá State. For the adjustment by regression was made a model identity test to verify the possibility of reducing the number of equations. One-hundred artificial neural networks were trained to estimate height, volume and taper by using the *Resilient Propagation* algorithm. Based on the precision parameters and residual distributions our results demonstrate that the estimates generated by the artificial neural networks are as efficient as the regression models.

Keywords: Floodplains forests, Artificial intelligence, Forest management and measurement, Pau-mulato.

INTRODUÇÃO

Nas florestas de várzea ao longo do estuário amazônico ainda não são empregadas tecnologias eficientes de corte e manejo. Na maioria dos casos, a extração madeireira é realizada manualmente por meio de ferramentas simples, diferentemente do uso de tecnologias mais avançadas empregadas em áreas de exploração madeireira de florestas de terra firme. Isto ocorre em virtude da dificuldade de acesso de maquinário, tais como *skidders*, *harvesters*, *feller bunchers* e *forwarders*, que sejam compatíveis com as características estruturais e físicas das florestas alagáveis.

Além da necessidade da adoção de técnicas eficientes de manejo é imprescindível a utilização de métodos precisos de quantificação dos produtos florestais, pois o mercado exige produtos diversificados e de alta qualidade (Leite et al., 2006). Neste sentido, são desenvolvidos estudos com diferentes abordagens estatísticas para definir a quantidade de madeira em determinado povoamento (Chichorro et al., 2003). Dentre as técnicas de estimativa, as equações hipsométricas, volumétricas e de afilamento (*taper*) são amplamente usadas no âmbito florestal, pois permitem a totalização do volume por unidade de área para determinado fim (Soares et al., 2011), além de possibilitarem estimativas de outros atributos do povoamento.

Sabe-se que a altura das árvores é um importante atributo para a estimativa volumétrica, como também um indicador de produtividade de um determinado sítio (Silva et al., 2012). No entanto, a mensuração dessa variável em florestas nativas tropicais torna-se difícil. Como alternativa são ajustadas equações hipsométricas que permitem estimar a altura em função do dap [diâmetro à 1,30 m de altura] (Soares et al., 2012), o que resulta na redução de custos e tempo de inventário. Em virtude da dificuldade de obtenção da altura, algumas equações volumétricas são disponibilizadas para florestas nativas com apenas o dap como variável preditora (Silva e Araújo, 1984). Todavia, árvores com mesmo diâmetro podem apresentar arquiteturas diferenciadas, com diferentes alturas, formas dos fustes e, por inferência, os volumes do fuste (Soares et al., 2011). Portanto, ao assumir que árvores com mesmo diâmetro apresentam o mesmo volume, pode resultar em estimativas tendenciosas e equações com erro de especificação por omissão de variáveis explicativas (Scolforo, 2005; Gujarati e Porter, 2011).

O volume de árvores é geralmente estimado com o emprego de modelos lineares ou não lineares com o dap e a altura total como preditores. O modelo de Schumacher e Hall (1933) é predominante na área florestal devido às suas propriedades estatísticas, facilidade de

ajuste e uso, além da geração de estimativas não tendenciosas (Campos e Leite, 2013). No entanto, diversos modelos vêm sendo sugeridos para o ajuste de equações de volume. Independentemente do modelo volumétrico, o melhor ajuste pode variar entre espécies e condições ambientais. Desta forma, recomenda-se a avaliação de diferentes modelos com o intuito de definir o modelo de melhor ajuste para cada caso (Machado et al., 2002).

Além do volume e altura, o afilamento do fuste é convencionalmente ajustado por modelos de regressão. O termo afilamento é utilizado para expressar a taxa de decréscimo do diâmetro ao longo do fuste das árvores. Estes modelos são considerados flexíveis por possibilitarem estimar o diâmetro em qualquer altura ao longo do fuste, estimar a altura em que determinado diâmetro ocorre, bem como estimar o volume total ou comercial, via integração da área das seções do tronco (Husch et al., 1972; Campos e Leite, 2013). Em outras palavras, podem ser usados para quantificar e estimar multiprodutos da madeira. No Brasil, o uso destes modelos é mais comum em florestas equiâneas, principalmente aplicados para espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. A aplicação para espécies nativas brasileiras ainda é incipiente e resume-se a alguns estudos, tais como para a espécie *Didymopanax morototonii* (Garcia et al., 1993), quantificação de multiprodutos da madeira em floresta atlântica (Chichorro et al., 2003), função de afilamento para *Virola surinamensis* no estuário amazônico (Leite et al., 2006), funções de afilamento para onze espécies nativas da Mata Atlântica do estado de Minas Gerais (Soares et al., 2011), funções de afilamento para estimar diâmetro de espécies comerciais do estado de Mato Grosso (Lansanova et al., 2013).

A carência de estudos desta natureza para florestas inequiâneas pode ser explicada pela alta diversidade de espécies e idades e, conseqüentemente, pelos diferentes perfis de troncos, o que resulta em baixa precisão das equações estimadas (Chichorro et al., 2003). Além disso, a descrição do perfil longitudinal dos fustes das árvores é uma operação complexa, uma vez que o tronco não segue o mesmo padrão de forma em toda a sua extensão e apresenta várias irregularidades (Favalessa et al., 2012), principalmente relacionadas à presença de sapopemas. A existência de grande variabilidade na forma do fuste tem significativa implicação para a determinação do volume em florestas tropicais. Neste sentido, para o cálculo da volumetria em inventários florestais são utilizados valores padronizados de fatores de formas sem levar em consideração as diferenças existentes entre as espécies, o que resulta em estimativas tendenciosas do estoque madeireiro (Lansanova et al., 2013).

No campo da mensuração e manejo florestal, a utilização de redes neurais artificiais (RNA) tem se mostrado uma alternativa promissora em relação às técnicas estatísticas convencionais. Essa ferramenta vem aprimorando técnicas de biometria e inventário florestal,

permitindo maior acurácia e precisão nas estimativas de crescimento e produção, dando suporte na tomada de decisão no manejo de florestas (Peng e Wen, 1999; Castellanos et al., 2007). Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos visando sua adaptação e parametrização para situações, tais como a estimação de altura e volume de árvores, afilamento, crescimento e produção, dentre outras aplicações (Leduc, 2001; Corne et al. 2004; Hanewinkel, 2005; Diamantopoulou, 2005; Gorgens et al., 2009; Silva et al., 2009; Binoti, 2010; Özçelik et al., 2010; Rodrigues et al., 2010; Leite et al., 2011; Soares, 2012).

As redes neurais artificiais são aproximações brutas das redes e neurônios encontrados no cérebro humano. Do ponto de vista prático, uma RNA consiste em várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais) conectadas entre si e dispostas em camadas formando um sistema computacional paralelo para executar uma determinada tarefa (Binoti, 2012; Bullinaria, 2014). A solução de problemas através desta técnica é bastante atrativa, devido a maneira como são representados internamente pela rede, e o paralelismo inerente à arquitetura das RNA criam a possibilidade de um desempenho superior em comparação aos modelos convencionais de regressão.

Os estudos sobre RNA se justificam por diversas propriedades e capacidades, tais como a tolerância a falhas (“defeitos” na implementação em software e hardware), tolerância a ruídos (*outliers*), aprendizagem e generalização, paralelismo maciço que as tornam muito eficientes, analogia neurobiológica, capacidade de modelar relações multivariáveis e não-lineares, facilidade em tratar variáveis qualitativas na modelagem e resultados superiores em relação aos métodos convencionais (Leite et al., 2011), e software livre específico para o setor florestal.

De um modo geral, observa-se que maior ênfase foi dada ao ajuste de equações hipsométricas, volumétricas e de afilamento para espécies exóticas de rápido crescimento, dada a importância econômica dessas espécies. Contudo, as florestas tropicais apresentam muitas espécies de alto valor comercial, de tal forma que estudos desta natureza devem ser desenvolvidos para aprimorar as técnicas e os métodos de mensuração (Soares et al., 2011).

Este estudo teve como objetivo ajustar, por meio de análise de regressão e redes neurais artificiais, equações hipsométricas, volumétricas e de afilamento do fuste de *Calycophyllum spruceanum* Benth., espécie arbórea muito abundante em áreas de florestas secundárias no estuário do rio Amazonas com o intuito de contribuir para o manejo da espécie.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da espécie

Calycophyllum spruceanum Benth. é uma espécie arbórea pioneira, pertence à família Rubiaceae e conhecida popularmente como pau-mulato, mulateiro ou capirona. Possui o fuste bastante retilíneo, com casca lisa de cor marrom ou esverdeada, delgada e escorregadia que descama anualmente em longas tiras deixando exposta a camada interna avermelhada (Lorenzi, 1992). Tem ocorrência ao longo da bacia amazônica (Brasil, Peru, Bolívia e Equador), preferencialmente em ambientes alagados de várzea. Por apresentar característica heliófila, a espécie tem boa regeneração em áreas abandonadas, como áreas de agricultura itinerante, desenvolvendo-se geralmente em agrupamentos quase homogêneos (Almeida, 2004; Applegate et al., 2000; Jong, 2001; Gonzáles, 2007).

O pau-mulato possui copa pequena e rala, favorecendo o consórcio ou a utilização em sistemas agroflorestais, pois permite a passagem de luz causando pouco sombreamento. A madeira é moderadamente pesada (com densidade básica variando de 0,78 a 0,85 g cm⁻³), compacta, de fácil trabalhabilidade, bastante resistente à deterioração, sendo empregada para marcenaria, confecção de esquadrias, cabos de ferramentas, compensados, caibros, ripas, tacos, tábuas para assoalho, estacas e peças torneadas e outros usos (D' Oliveira et al., 1992; Lorenzi, 1992). No estuário amazônico, o pau-mulato está entre as cinco espécies mais utilizadas para produção de madeira, visando o atendimento das demandas de construção de casas, fabricação de móveis, instalação de cercados (Queiroz e Machado, 2007). No Amapá, por exemplo, estima-se que dos R\$ 16 milhões gerados anualmente com a venda de madeira de várzea nos canais Pedrinhas e Jandiá, no município de Macapá, e canal Bueiro, no município de Santana, aproximadamente 20% dessa receita é proveniente da comercialização da espécie (Guedes et al., 2012).

No Peru, *C. spruceanum* tem sido utilizada em sistemas agroflorestais (SAF) com o objetivo de produção de madeira para lenha e carvão, pois também apresenta alto poder calorífico (Sotelo-Montes e Weber, 1997; Sotelo-Montes, Vidaurre, Weber, 2003). Em SAF com idade entre 5 e 11 anos implantados em áreas com regeneração natural de *C. spruceanum* no município de Mazagão-AP, o estudo de Guedes et al. (2012) mostrou que a espécie tem crescimento relativamente alto, com incremento em diâmetro variando de 0,9 a 2,4 cm ano⁻¹.

Áreas de estudo

O estudo foi realizado em dois municípios, Mazagão (00° 14' 35"S e 51° 22' 59"O) e Gurupá (00° 29' 27"S e 51° 24' 31"O), localizados nos estados do Amapá e Pará, respectivamente. Em cada município foram selecionados dois sítios, os quais pertencem à diferentes proprietários rurais que permitiram que este estudo fosse conduzido (Figura 1). As árvores de *C. spruceanum* nos dois sítios de Mazagão foram originadas de roçados abandonados pela agricultura itinerante, com posterior manejo da regeneração natural e enriquecimento com outras espécies, principalmente o açai (*Euterpe oleracea*), para a formação dos sistemas agroflorestais. Por outro lado, em Gurupá os dois sítios consistem de povoamento puros, sem enriquecimento, pois os proprietários rurais possuem microserarias com finalidade de exploração da madeira da espécie. Em Mazagão os dois povoamentos de *C. spruceanum* tinham idades de 72 e 120 meses e em Gurupá, 60 e 72 meses, quando foi realizada a coleta de dados para este estudo. O histórico de uso das áreas foi obtido por meio de entrevistas semiestruturadas com o uso de formulários que continham perguntas relativas ao ano de implantação e abandono do roçado, sendo possível estimar a idade dos povoamentos.

O clima da região é do tipo Ami, equatorial super úmido, de acordo com a classificação de Köppen. A temperatura média mínima é de 23°C e a média máxima de 38°C, com umidade relativa acima de 80%. A precipitação pluviométrica anual oscila em torno de 2.500 mm, concentrada entre os meses de janeiro a julho (Gazel-Filho et al., 2008). O solo é classificado como Gleissolo Háptico (Santos e Tardin, 2003), com predomínio de textura siltosa e elevada fertilidade. A vegetação da região de estudo é composta por Floresta Ombrófila Densa Aluvial, no Brasil conhecida como floresta de várzea (IBGE, 2012).

Nas áreas de estudo vem sendo desenvolvido um projeto de longo prazo denominado de “Ecologia e Manejo Florestal para Uso Múltiplo de Várzeas do Estuário Amazônico (FLORESTAM)”. Este projeto de pesquisa iniciou-se no ano de 2010, sob a liderança da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Amapá e tem como meta ampliar os conhecimentos sobre o ecossistema de várzea e a partir disso, promover soluções e inovações para o manejo florestal sustentável e o uso múltiplo das espécies nativas das várzeas do estuário do Rio Amazonas.

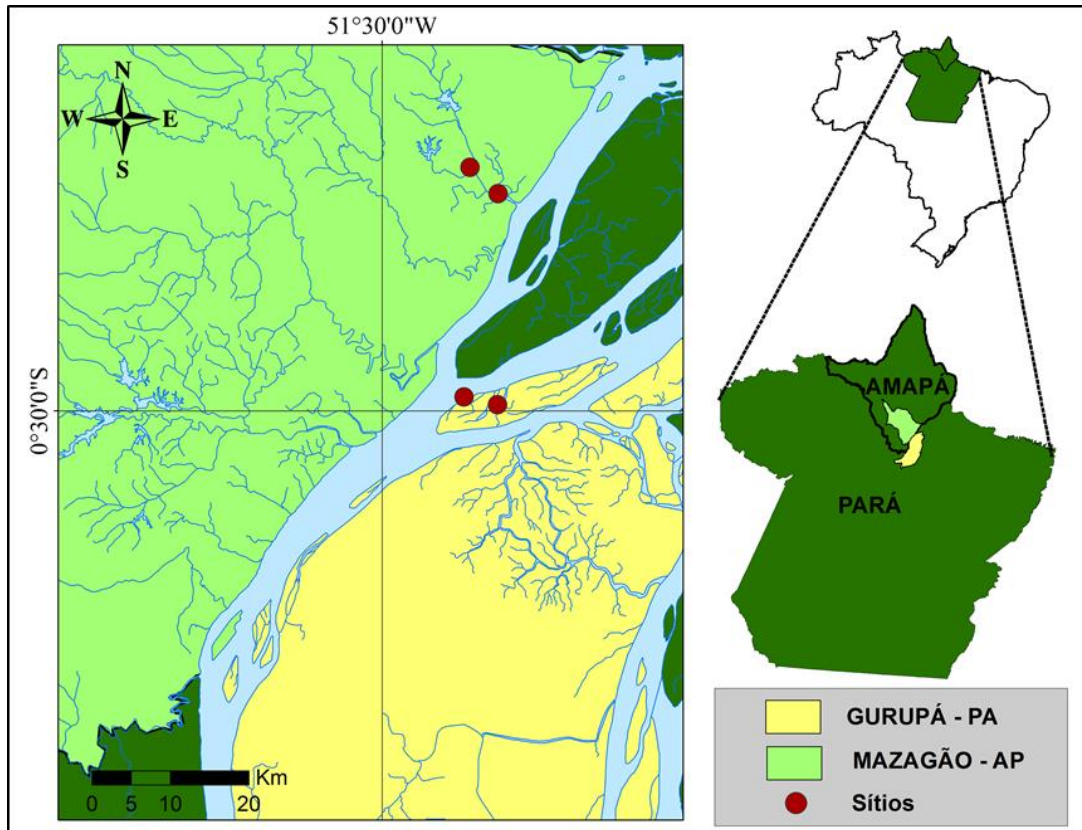


Figura 1. Localização das quatro áreas de estudo situadas em florestas de várzea estuarina nos estados do Amapá e Pará.

Coleta de dados

Com o uso de motosserra foram derrubadas 695 árvores-amostra nos quatro povoamentos de *C. spruceanum*, sendo 160 árvores para o povoamento de 60 meses de idade, 482 árvores para dois povoamentos de 72 meses de idade e 53 árvores para o povoamento de 120 meses de idade. Depois de derrubadas as árvores foram cubadas. O critério de inclusão foi de dap superior a 4 cm. O volume com casca de cada árvore abatida foi obtido pelo método de Smalian, que consiste na medição dos diâmetros nas extremidades de cada seção do fuste. Desta forma, o volume das árvores foi determinado pelo somatório do volume das diferentes seções de 1 m. A seguinte fórmula foi usada para o cálculo do volume de cada seção (Machado e Filho, 2003):

$$V_i = \frac{(g_1 + g_2)}{2} L$$

Em que: V_i = volume da seção i da tora em m^3 ; g_1 = área seccional na base da seção i da tora (m^2); g_2 = área seccional no topo da seção i da tora (m^2); L = comprimento da seção da tora em m; i = número de seções da tora ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Modelos de regressão para as estimativas de altura, volume e afilamento do fuste

Após a cubagem rigorosa das 695 árvores-amostra foram ajustados os seguintes modelos hipsométricos, utilizando o software CurveExpert versão 1.4 (Hyams, 1993):

- a) Exponencial: $Ht = \beta_0 e^{\beta_1 / dap} + \varepsilon$
- b) Gompertz: $Ht = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 dap}} + \varepsilon$
- c) Logística: $Ht = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 e^{-\beta_2 dap})} + \varepsilon$

Em que: Ht = altura total (m); e = exponencial; β_i = parâmetros do modelo; dap = diâmetro (cm) a 1,30 m de altura; ε = erro aleatório.

Para o volume, o modelo adotado foi proposto por Schumacher e Hall (1933), utilizando o software Statistica versão 10 (Statsoft, 2012):

$$V = \beta_0 + dap^{\beta_1} Ht^{\beta_2} + \varepsilon$$

Em que: V = volume (m³); dap = diâmetro (cm) a 1,30 m de altura; Ht = altura total da árvore (m); β_i = parâmetros do modelo; ε = erro aleatório.

Foram ajustados quatro modelos de afilamento, utilizando o algoritmo Gauss-Newton do software Statistica versão 10 (Statsoft, 2012):

- a) Demaerschalk (1972): $d_i^2 dap^{-2} = 10^{2\beta_0} dap^{2\beta_1-2} Ht^{2\beta_2} (Ht - h_i)^{2\beta_3} + \varepsilon$
- b) Garay (1979): $ddap^{-1} = \beta_0 \left(1 + \beta_1 \ln \left(1 - \beta_2 h_i^{\beta_3} Ht^{-\beta_3} \right) \right) + \varepsilon$
- c) Kozak (1969): $d_i^2 dap^{-2} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{Ht} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{Ht} \right)^2 + \varepsilon$
- d) Ormerod (1973): $d_i^2 dap^{-2} = \left[\frac{(Ht - h_i)}{(Ht - 1,30)} \right]^{2\beta_1} + \varepsilon$

Em que: d_i = diâmetro na altura h_i , em cm; dap = diâmetro (cm) a 1,30 m de altura; Ht = altura total (m); h = altura ao longo do fuste (m); β_i = parâmetros do modelo; ε_i = Erro aleatório; Ln = Logaritmo natural.

Teste de identidade dos modelos

Os modelos hipsométricos, volumétricos e de afilamento foram ajustados em nível geral (modelo reduzido) e estratificados por idade (modelo completo). O teste de identidade de modelos foi utilizado para verificar a necessidade de uso de equações específicas para cada idade ou se apenas uma equação geral pode ser usada, conforme Regazzi (2003), Regazzi e Silva (2010) (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de variância para o teste de identidade do modelo

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F calculado
Parâmetros do Modelo Completo	n_1	SQParC		
Parâmetros do Modelo Reduzido	n_2	SQParR		
Redução devido a H_0	$(n_1 - n_2)$	SQRHo	$SQRHo / (n_1 - n_2)$	$QMRHo / QMRes$
Resíduo	$N - n_1$	SQRes	$SQRes / (N - n_1)$	
Total	N	SQT		

Em que: GL = graus de liberdade, n_1 = número de parâmetros do modelo completo, n_2 = número de parâmetros do modelo reduzido, N = número total de observações, SQ = soma dos quadrados, QM = quadrado médio.

Para cálculo da soma dos quadrados utilizou-se as seguintes expressões:

$$SQT = \sum Y^2$$

$$SQParC = SQT - \sum (Y - \hat{Y}_c)^2$$

$$SQParR = SQT - \sum (Y - \hat{Y}_r)^2$$

$$SQHo = SQParC - SQParR$$

$$SQRes = SQT - SQParC$$

Em que: \hat{Y}_c e \hat{Y}_r os estimadores para os modelos completo e reduzido, respectivamente.

As hipóteses testadas foram:

- H_0 = as equações estimadas pelos modelos completo e reduzido são iguais.
- H_1 = não H_0 .

Redes Neurais Artificiais para estimativas de altura, volume e afilamento do fuste

O procedimento usual em RNA inicia-se na fase de aprendizagem ou treinamento, em que um conjunto de exemplos de um problema é apresentado à rede que extrai as características necessárias para representar a informação fornecida e gerar respostas para o problema. Posteriormente, verifica-se a qualidade do treinamento e capacidade de generalização da rede, ou seja, a capacidade da rede dar respostas coerentes para dados não utilizados na fase de aprendizagem (Haykin, 2001; Braga et al., 2007).

Para obtenção das estimativas de altura, volume e afilamento do fuste das árvores de *C. spruceanum* foram treinadas 100 redes neurais artificiais (RNA) do tipo *multilayerperceptron* (MLP) ou perceptron de múltiplas camadas utilizando os dados das 695 árvores cubadas de *C. spruceanum*, sendo que 70% dos dados foram usados para treinamento e 30% para validação. O algoritmo de aprendizado utilizado foi o *Resilient propagation*, com o número de neurônios da camada de entrada igual à soma das variáveis contínuas mais categóricas, e o número dos neurônios intermediários igual a 8 para todos os casos. Como critérios de parada foram utilizados a minimização do erro quadrático médio (0,0001) e o número de ciclos (3000). As variáveis numéricas foram normalizadas linearmente no intervalo de 0 a 1 (Heaton, 2011).

Para o ajuste hipsométrico as variáveis contínuas de entrada (*inputs*) foram dap e idade, e como variável de saída (*outputs*) a altura total. A função de ativação utilizada foi a tangente hiperbólica tanto para os neurônios intermediários quanto para os neurônios de saída.

Para o ajuste volumétrico as variáveis contínuas de entrada (*inputs*) foram dap, altura total e idade, e como variável de saída (*outputs*) o volume individual da árvore. A função de ativação utilizada foi a sigmoideal tanto para os neurônios intermediários quanto para os neurônios de saída.

Para o ajuste de afilamento do fuste as variáveis contínuas de entrada (*inputs*) foram dap, altura total, posição ao longo do fuste e idade, e como variável de saída (*outputs*) o diâmetro comercial. A função de ativação utilizada foi a sigmoideal tanto para os neurônios intermediários quanto para os neurônios de saída.

O treinamento das redes neurais artificiais foi realizado por meio do software *Neuroforest* 3.2 disponível em <<http://neuroforest.ucoz.com/>>.

Critérios estatísticos para avaliação dos modelos e das RNA

Para evitar julgamentos pessoais na seleção das equações hipsométricas, volumétricas, de afilamento e das melhores redes neurais artificiais foram utilizados os seguintes critérios de avaliação: análise gráfica dos resíduos, coeficiente de correlação ($R_{\hat{y}y}$) entre valores observados e estimados, bias, raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM) e média das diferenças absolutas (MDA). Estas estatísticas foram estimadas pelas seguintes expressões:

$$\text{Resíduos (\%)} = \frac{(\hat{Y} - Y)}{Y} \cdot 100$$

$$R_{\hat{y}y} = \frac{n^{-1} (\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y}))}{\sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2 (n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}}; \hat{Y}_m = n^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i$$

$$\text{Bias} = n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)$$

$$\text{RQEM} = 100\bar{Y}^{-1} \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

$$\text{MDA} = \left(n^{-1} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \right)$$

Em que: Y_i e \hat{Y}_i = valores observados e estimados da variável sob análise, respectivamente; \bar{Y} = média dos valores da variável sob análise; n = número de casos

RESULTADOS

Altura total

Dentro de cada um dos três modelos testados, as medidas de precisão apresentaram valores muito similares entre as três classes de idade e entre as classes e o modelo geral. A comparação entre modelos mostra também que os três modelos apresentaram precisões bastante semelhantes independentemente da idade (Tabela 2). Além disso, verifica-se uma distribuição dos resíduos homogênea ao longo do dap para todos casos (APÊNDICE A), indicando não tendenciosidade nas estimativas da altura total em quaisquer tamanhos das árvores. Todos os modelos são indicados para a espécie por apresentar tendência de estabilização do crescimento em altura das árvores (maior realismo biológico), uma característica dos modelos não lineares (Figura 2).

Tabela 2. Coeficientes e medidas de precisão dos modelos hipsométricos ajustados para *C. spruceanum*, em nível geral e estratificados por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Modelo	Idade (meses)	Parâmetros			R _{yy}	Bias	MDA	RQEM %
		β_0	β_1	β_2				
Exponencial	60	21.0233	-5.4630		0.8093	0.004	1.02	13.7
	72	19.6852	-5.2205		0.7784	-0.002	1.00	12.9
	120	25.9005	-5.8049		0.8423	0.003	1.23	10.8
	Geral	22.6064	-6.0685		0.8039	0.010	1.14	14.6
Gompertz	60	18.8551	0.7118	0.1547	0.8156	-0.001	1.01	13.5
	72	23.2038	0.6539	0.1039	0.7909	-0.005	0.97	12.5
	120	19.8619	0.7878	0.1942	0.8361	0.003	1.25	11.0
	Geral	27.9542	0.7534	0.0940	0.8216	-0.004	1.08	13.9
Logística	60	17.1560	4.3670	0.2392	0.8159	-0.001	1.01	13.5
	72	18.8248	3.9696	0.1890	0.7912	-0.005	0.97	12.5
	120	19.6877	3.7234	0.2323	0.8329	0.001	1.26	11.1
	Geral	22.7884	4.8632	0.1724	0.8215	-0.004	1.08	14.0

Embora não se tenha verificado diferenças discrepantes das medidas de precisão entre as idades, os testes de identidade revelaram que para povoamentos de *C. spruceanum* a idade tem um efeito significativo sobre os parâmetros dos modelos ajustados ($p < 0,01$ para todos os casos, APÊNDICE B), o que sugere o uso de equações hipsométricas da espécie por idade.

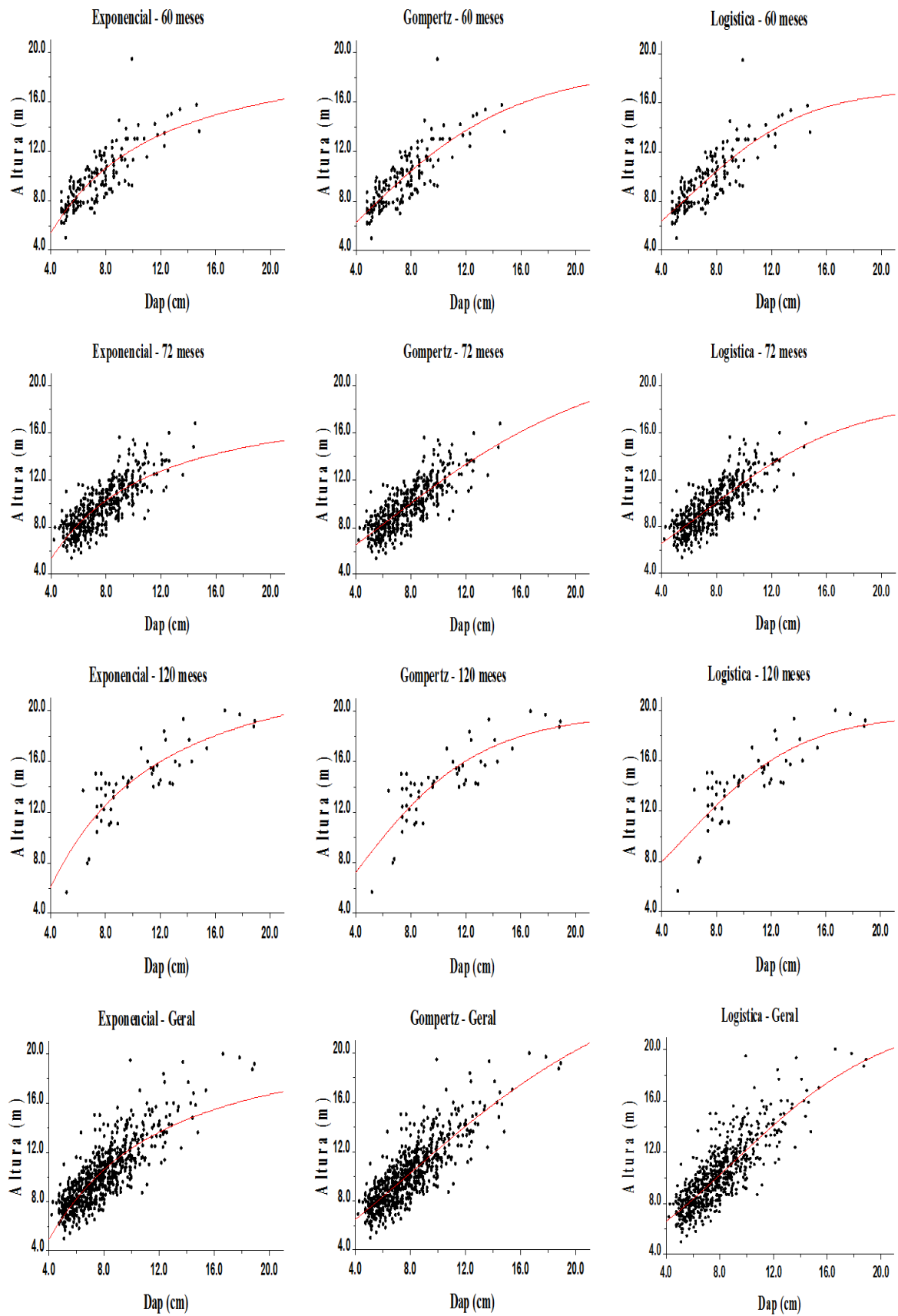


Figura 2. Curvas hipsométricas ajustadas para *C. spruceanum*, em nível geral e estratificadas por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Três das 100 redes neurais artificiais treinadas apresentaram as melhores medidas de precisão (RNA 17, 64 e 80), com R^2 de 86% e RQEM de aproximadamente 12,5% tanto para os dados de treinamento como para dados da validação (APÊNDICE C). Ao contrário dos modelos hipsométricos ajustados por regressão, para o treinamento das redes não houve estratificação dos dados de *C. spruceanum* por idade, pois a rede já possibilita a inserção desta variável contínua no ajuste e gera resultados precisos, sem tendenciosidade.

As redes neurais selecionadas também apresentaram comportamentos semelhantes pela análise gráfica dos resíduos, ficando evidente a homocedasticidade de variância e ausência de tendenciosidade nas estimativas das alturas em função do tamanho das árvores (APÊNDICE D). A dispersão das alturas observadas em função do dap mostra que as redes neurais conseguiram gerar boas estimativas de altura total para as árvores de *C. spruceanum*, considerando que não houve estratificação por idade. Observa-se também que há três linhas de ajuste, uma para cada idade (60, 72 e 120 meses), sendo que as idades 60 e 72 meses estão quase sobrepostas (Figura 3).

Tanto as estimativas geradas por regressão quanto as obtidas por RNA resultaram em baixos valores para Bias e MDA, confirmando boa precisão nos ajustes. O Bias indica a existência ou não de tendências entre os resíduos, porém não mede o quão afastados do eixo zero estão os valores residuais. Já a MDA fornece justamente a ideia da amplitude dos erros.

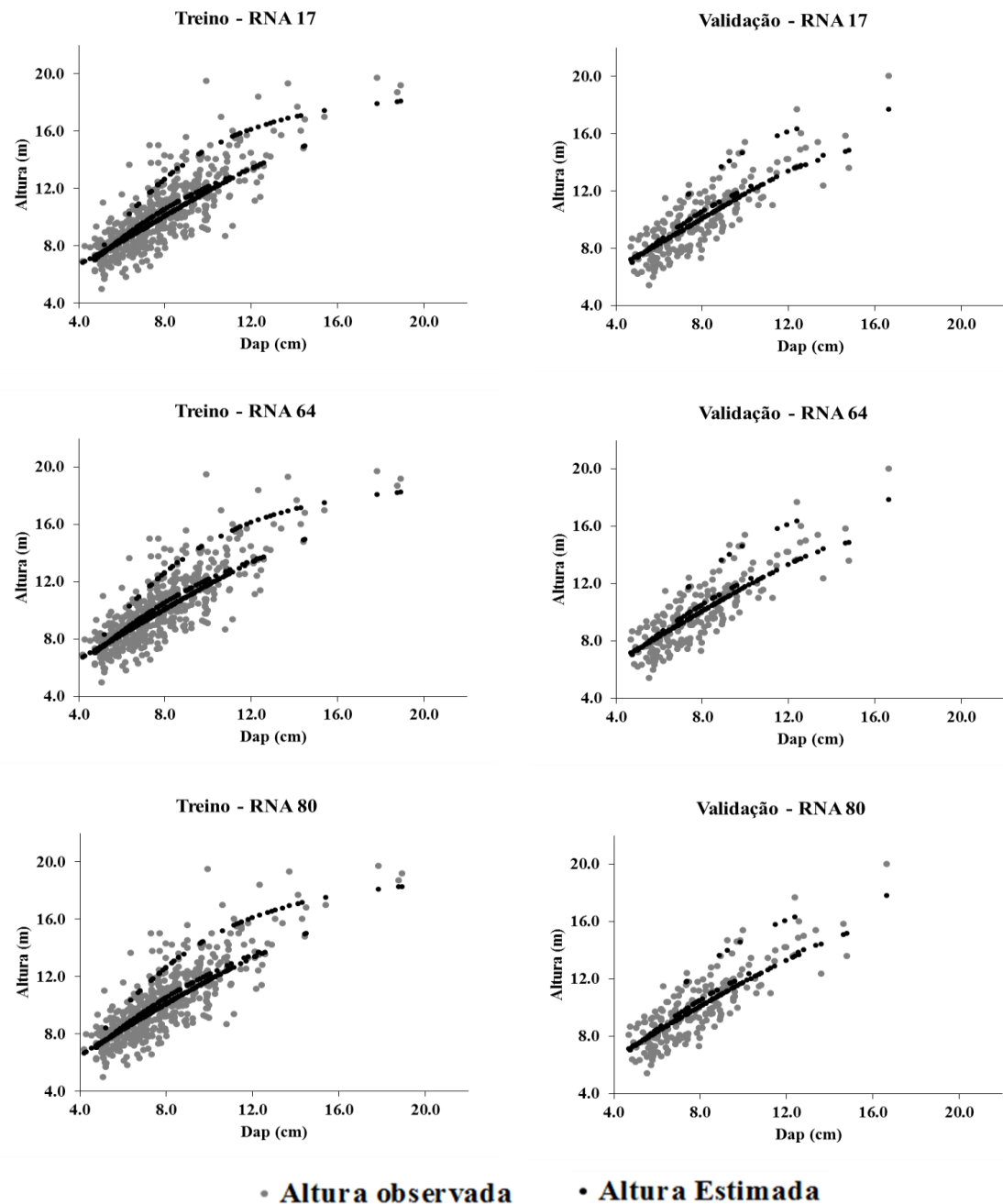


Figura 3. Curvas hipsométricas das redes neurais ajustadas para *C. spruceanum* em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Volume

As estimativas volumétricas de *C. spruceanum* provenientes do ajuste por regressão convencional apresentaram resultados semelhantes aos obtidos por meio das redes neurais artificiais, ambas com baixos valores para Bias e MDA. Quanto menores as estimativas para Bias e MDA, mais confiáveis são os modelos ajustados.

As equações de volume de Schumacher e Hall ajustadas para as diferentes idades apresentaram valores menores de RQEM para os dois povoamentos mais jovens (60 e 72 meses), porém os valores de R^2_{yy} foram semelhantes entre as idades e o modelo geral (Tabela 3). Independentemente da idade, a distribuição dos resíduos foi homogênea para os quatro casos (APÊNDICE E). A distribuição dos valores observados *versus* estimados de volume em função do dap (cm) tem a mesma tendência (Figura 4).

Houve diferença significativa entre o modelo geral ajustado em relação aos modelos estratificados por idade ($p < 0,01$), ou seja, não é indicado utilizar uma única equação (com os mesmos parâmetros) para estimativas de volume de *C. spruceanum* (APENDICE B).

Tabela 3. Coeficientes e medidas de precisão dos modelos volumétricos ajustados para *C. spruceanum*, em nível geral e estratificados por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Modelo	Idade (meses)	Parâmetros			R^2_{yy}	Bias	MDA	RQEM %
		β_0	β_1	β_2				
Schumacher e Hall	60	0.00006	1.92333	1.00739	0.9810	0.0002	0.0031	15.8
	72	0.00008	1.98124	0.80140	0.9668	0.0002	0.0037	16.4
	120	0.00018	2.13893	0.38776	0.9638	0.0002	0.0121	21.3
	Geral	0.00008	1.99038	0.80224	0.9746	0.0001	0.0042	20.1

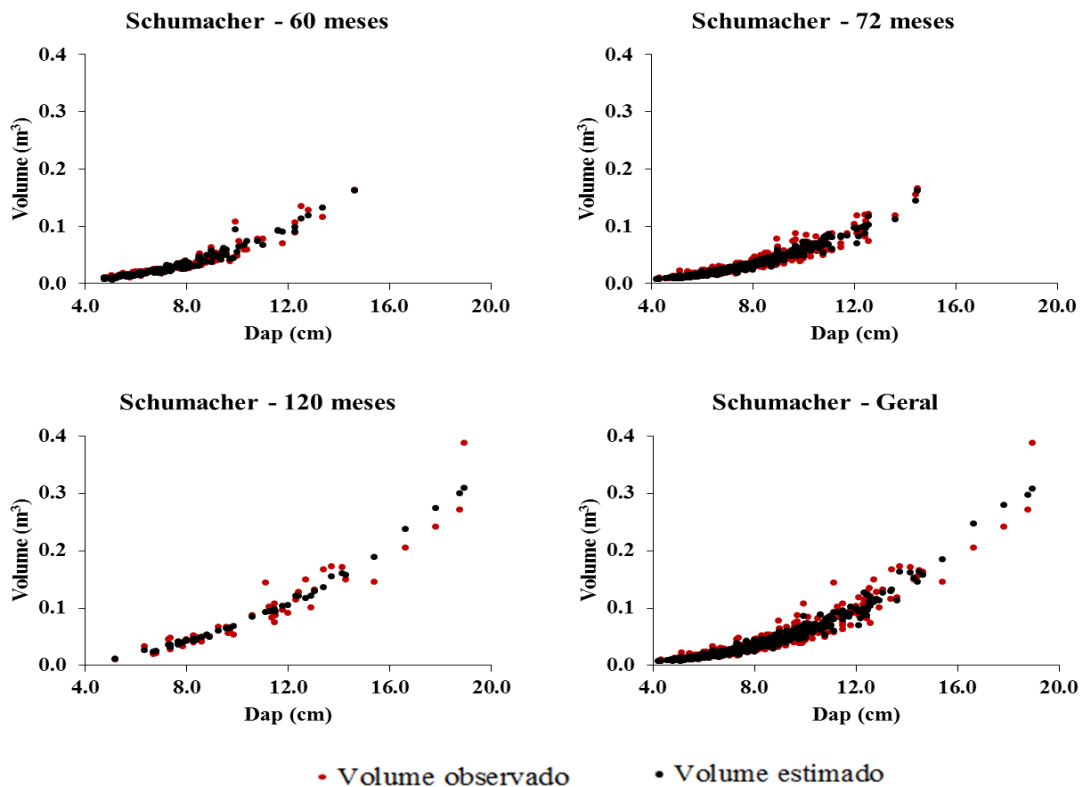


Figura 4. Valores observados e estimados de volume pelo modelo de Schumacher e Hall para *C. spruceanum*, em nível geral e estratificadas por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Após o treinamento das 100 redes neurais para volume individual das árvores, foram retidas as três redes que apresentaram melhor desempenho nas estimativas. Estas três redes apresentaram R^2 igual a 0,98 e RQEM variando de 18 a 18,8% (APÊNDICE F). A distribuição dos resíduos das redes 4, 16 e 91 apresentaram comportamento uniforme ao longo do dap (APÊNDICE G). Os ajustes obtidos por meio das RNA mantiveram a mesma distribuição dos valores observados para o volume, o que significa que não houve distorções nas estimativas, tanto no treino como na validação (Figura 5). As diferentes redes ajustadas foram identificadas de forma numérica, de acordo com a sequência de trabalho, não significando preferência.

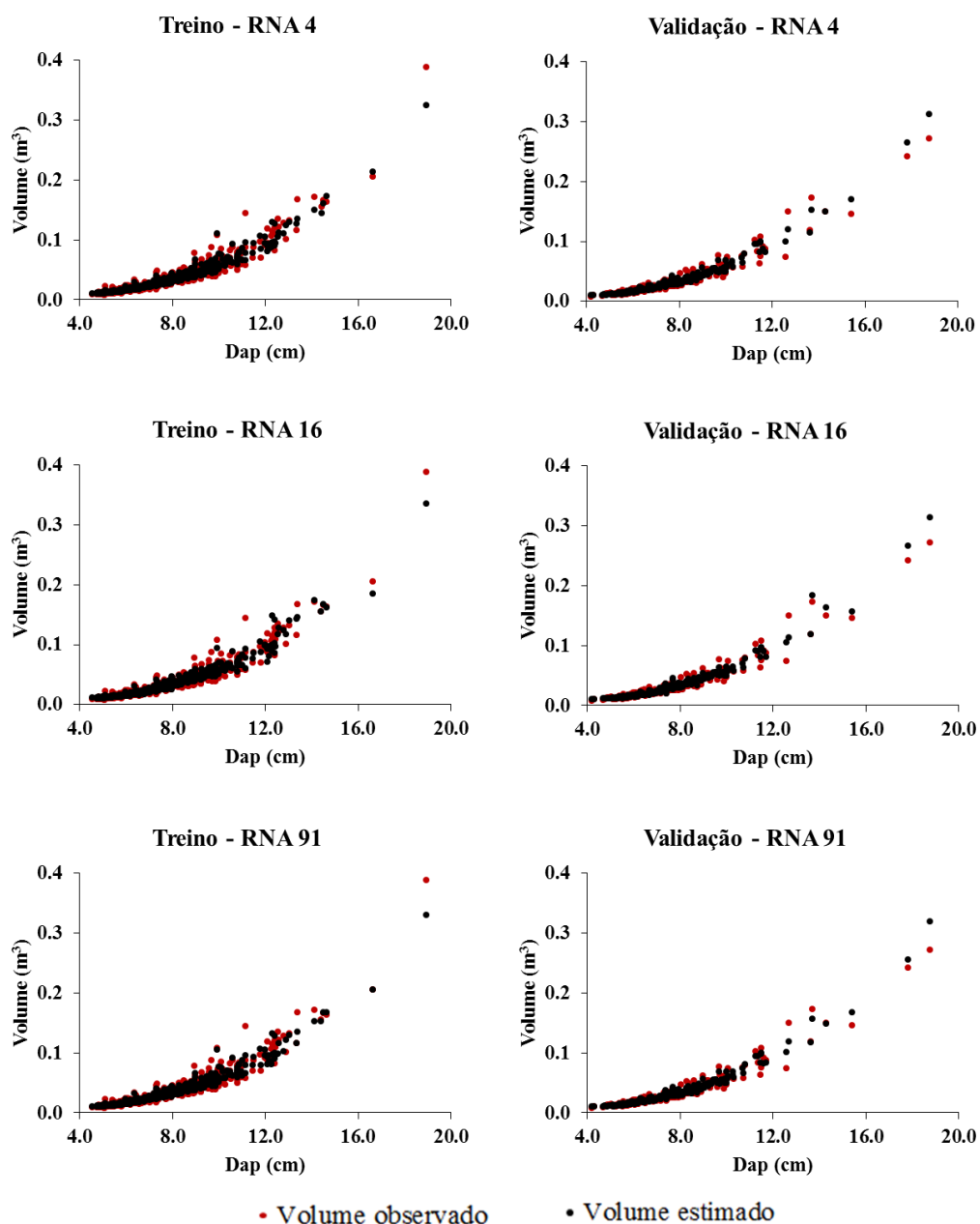


Figura 5. Valores observados e estimados de volume pelas redes neurais para o *C. spruceanum*, em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Afilamento do fuste

Dos modelos de regressão tradicionais, o modelo de Garay apresentou maior precisão para descrever o perfil do fuste de *C. spruceanum* em diferentes idades, com os valores de RQEM (%) mais baixos, aproximadamente 8%. Em contrapartida, o modelo de Ormerod, que possui apenas um parâmetro, apresentou os menores valores para R $\hat{y}y$ e maiores para RQEM (%) (Tabela 4).

O modelo de Garay demonstrou gerar boas estimativas ao longo de todo o fuste de *C. spruceanum*, condizente com a característica peculiar da espécie que é o fuste reto e pouco cônico, apresentando também distribuição residual uniforme ao longo do diâmetro (cm) (Figura 6), enquanto que os modelos de Demaerschalk e Ormerod apresentaram tendência a subestimar o diâmetro do fuste nas partes mais próximas do topo e o modelo de Kozak superestimou os diâmetros nas partes superiores do fuste (APENDICE H).

O afilamento do fuste, assim como a altura e o volume, é afetado pela idade do povoamento ($p < 0,01$). Dessa forma, não é adequado utilizar uma equação geral para descrever o perfil do fuste de *C. spruceanum* (APENDICE B), pois provavelmente serão obtidas estimativas enviesadas.

Tabela 4 Coeficientes e medidas de precisão dos modelos de afilamento ajustados para o *C. spruceanum*, em nível geral e estratificados por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Modelo	Idade (meses)	Parâmetros				R $\hat{y}y$	Bias	MDA	RQEM %
		β_0	β_1	β_2	β_3				
Demaerschalk	60	0.19354	0.95026	-0.43079	0.38649	0.9601	0.011	0.46	9.7
	72	0.20231	0.95179	-0.42920	0.38515	0.9354	0.015	0.61	11.8
	120	0.16908	0.91917	-0.35039	0.33203	0.9487	0.025	0.69	11.8
	Geral	0.18216	0.94984	-0.40867	0.37326	0.9457	0.014	0.59	11.6
Garay	60	1.60539	0.32064	0.91091	0.12435	0.9754	0.098	0.39	8.0
	72	1.82724	0.56873	0.72175	0.13765	0.9670	-0.102	0.44	8.7
	120	1.57997	0.43052	0.81871	0.15002	0.9711	0.111	0.57	9.3
	Geral	2.52463	0.18785	0.98869	0.01391	0.9713	0.060	0.44	8.8
Kozak	60	1.39169	-3.04680	2.25597		0.9670	0.052	0.43	9.1
	72	1.50028	-3.41947	2.58320		0.9510	0.035	0.53	10.4
	120	1.30574	-2.64361	1.75943		0.9598	0.073	0.65	10.7
	Geral	1.43950	-3.16772	2.30793		0.9597	0.056	0.53	10.5
Ormerod	60		0.72970			0.9592	0.158	0.42	10.0
	72		0.68875			0.9328	0.279	0.54	12.7
	120		0.62138			0.9471	0.215	0.66	12.2
	Geral		0.67844			0.9439	0.240	0.53	12.3

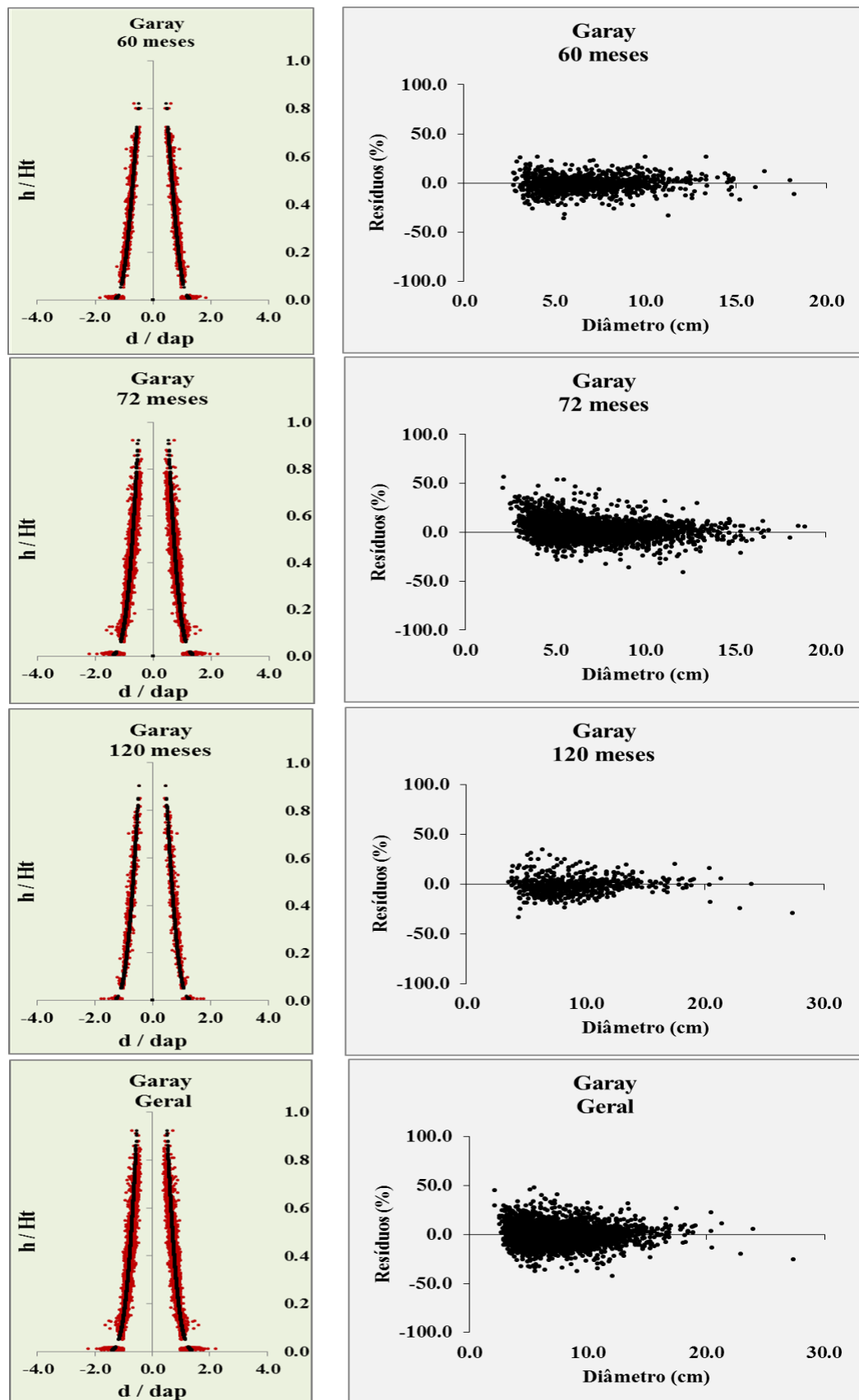


Figura 6. Dispersão dos dados de d/dap observados e estimados pelo modelo de Garay (eixo x) em função de h/Ht (eixo y) para *C. spruceanum* (Pontos vermelhos são dados observados e pontos pretos são dados estimados).

A avaliação das estatísticas das três melhores redes neurais (RNA 10, 53, 77) mostra que, do mesmo modo que ocorreu com o volume e altura, ambas apresentaram alta R^2 ($\pm 98\%$) e baixos valores de RQEM ($\pm 8\%$), o que comprova que as estimativas dos diâmetros ao longo do fuste foram precisas (APENDICE I). Tanto para a fase de treino como na validação, constatou-se que para as redes selecionadas os diâmetros estimados têm o mesmo comportamento dos diâmetros observados, o que evidencia a precisão encontrada pelas RNA (Figura 7). Além disso, as redes tiveram uma boa representação da forma do fuste de *C. spruceanum* que é reto e com pouca conicidade. A distribuição dos resíduos das redes apresentou comportamento uniforme ao longo do diâmetro (APÊNDICE J).

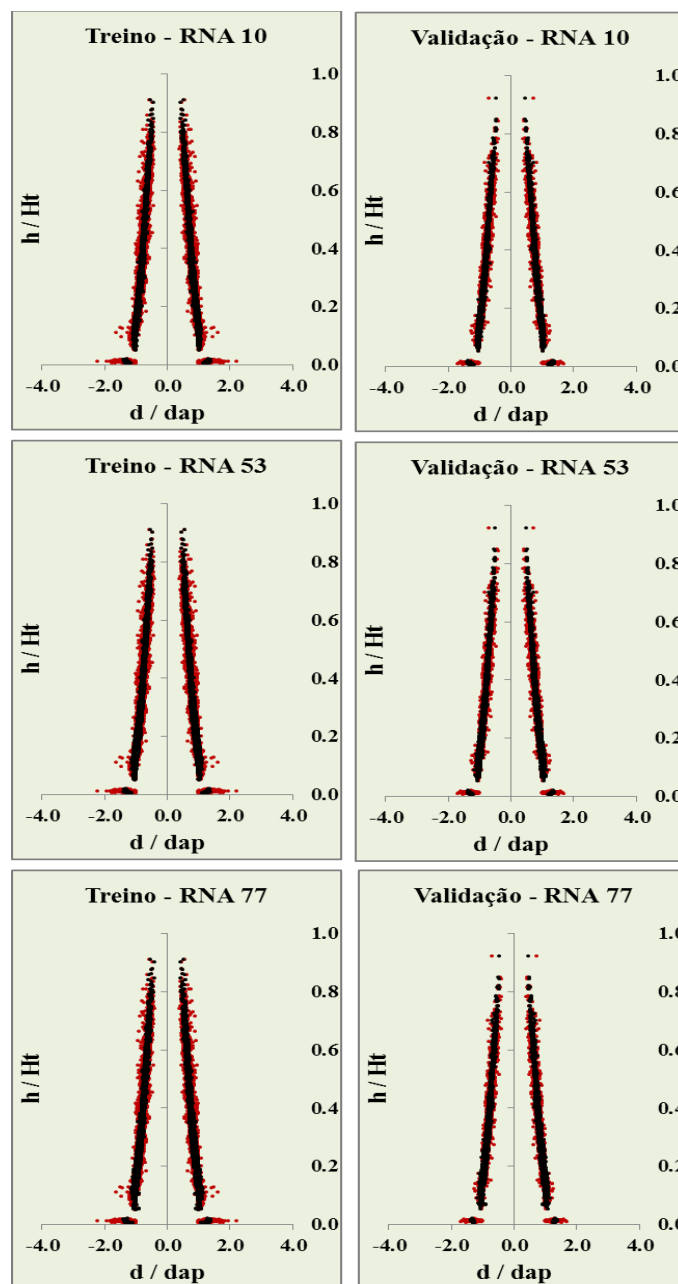


Figura 7. Dispersão dos dados de d/dap observados e estimados pelas RNA (eixo x) em função de h/Ht (eixo y) para *C. spruceanum* (Pontos vermelhos são dados observados e pontos pretos são dados estimados).

DISCUSSÃO

No presente estudo, foi possível empregar a idade dos povoamentos de *C. spruceanum*, pois eram conhecidos os históricos dos sítios estudados. Os três modelos testados estratificados por idade, Exponencial, Gompertz e Logística, resultaram em estimativas mais adequadas para altura de *C. spruceanum* do que modelos gerais, pois esta estratificação reduz a possibilidade de viés (super ou subestimação da altura), embora em termos de precisão os modelos ajustados tenham apresentado comportamentos semelhantes. Vale ressaltar que a idade é uma variável nem sempre conhecida, o que dificulta a escolha de equações hipsométricas. Dessa forma, para estes casos é mais recomendável o uso de um modelo geral. Para povoamentos com idades mais avançadas ou crescendo em sítios de baixa qualidade esperam-se curvas hipsométricas com maior tendência à estabilização (Machado et al., 2008). A curva hipsométrica para o povoamento de *C. spruceanum* na idade de 120 meses apresentou este tipo de tendência.

A arquitetura de uma árvore (a distribuição espacial de seus componentes, fuste e copa, ao longo do eixo horizontal e vertical) pode ser influenciada por diversos fatores (Batista et al., 2001; Guimarães, 2009). Os modelos hipsométricos mais simples que utilizam apenas o dap como variável independente nem sempre resultam em estimativas precisas, uma vez que a altura das árvores é dependente de outros fatores. Portanto, a inclusão das variáveis do povoamento como a altura dominante e o índice local de sítio e a densidade de indivíduos, pode resultar em estimativas de altura mais precisas (Campos e Leite, 2013). Bartoszeck et al. (2004) mostraram que a idade e o sítio afetaram a relação hipsométrica de Bracatinga (*Mimosa scabrella*), embora a densidade não tenha resultado em efeito significativo. Azevedo et al. (1999), ao analisarem a relação hipsométrica para quatro espécies da Amazônia ocidental em plantios homogêneos, em quatro diferentes idades, concluíram que a relação altura *versus* dap varia de acordo com a idade do povoamento, não podendo ser utilizada uma equação comum para povoamentos de diferentes idades. Araújo et al. (2012) testando modelos hipsométricos para plantio de candeia (*Eremanthus erythropappus*) com diferentes espaçamentos e idades, em Minas Gerais, concluíram por meio do teste de identidade de modelos que não é possível aplicar uma única equação contemplando as diferentes condições.

A inclusão de características dos povoamentos (índice de sítio, densidade e idade) para o ajuste de modelos hipsométricos, apresenta várias vantagens, tais como ajustes com maior precisão e a aplicabilidade das equações para diferentes sítios. No entanto, a inclusão de muitas variáveis resulta em uma maior complexidade de modelagem (Binoti et al., 2013),

pois, implica em ter representatividade com frequência suficiente para todas as combinações de variáveis. No caso de redes neurais artificiais importa a variabilidade e não a quantidade de dados. Tais relações apresentam características não lineares ou valores categóricos, a exemplo do índice de sítio, podendo ser incluídas em regressões somente como variáveis binárias. Diante disso, as RNA tornam-se uma abordagem alternativa para a estimativa de altura de árvores em povoamentos florestais. A habilidade de extrair relações não lineares entre os dados durante o processo de aprendizagem torna essa técnica muito atraente na modelagem. Além disso, essa abordagem permite a inclusão de variáveis categóricas no ajuste com facilidade, sendo uma das vantagens diante da dificuldade de inserir variáveis binárias em modelos de regressão (Binoti, 2010; Binoti et al., 2012).

As redes neurais ajustadas para estimar altura de *C. spruceanum* apresentaram estimativas precisas e não tendenciosas, sendo que a principal vantagem em relação a regressão tradicional é que apenas uma RNA é suficiente para estimar altura, pois não foi necessário realizar a estratificação por idade. Como as áreas de coleta estão situadas em locais com características biofísicas semelhantes, não houve a necessidade da inclusão de mais variáveis, mas ressalta-se que a adição de outras variáveis, além de dap e idade, não resultaria em complexidade para o ajuste das RNA e o mais importante, sempre as redes neurais requererão muito menos dados em relação ao emprego de regressão.

Diamantopoulou (2012) e Diamantopoulou e Ozçelik (2012) concluíram em suas pesquisas que os modelos de RNA foram superiores aos modelos de regressão não-lineares testados para altura de árvores. Binoti et al. (2013) avaliando dois cenários: (a) quando há a introdução de um novo material genético e não existem informações sobre a relação hipsométrica deste; (b) quando já se conhece a tendência de crescimento em altura dos povoamentos implantados, obtida pela existência de medições em parcelas de IFC, concluíram que as metodologias mostraram-se eficientes para alcançar os objetivos propostos, garantindo alta precisão das estimativas obtidas através das redes neurais artificiais.

Sabe-se que as equações volumétricas são ferramentas básicas na atividade florestal, uma vez que quantificar o volume de madeira de um povoamento é essencial para realizar qualquer procedimento florestal e implementação de planos de manejo (Leite e Andrade, 2002). Dessa forma, diversos modelos de regressão linear e não linear são investigados para a estimação do volume de povoamentos florestais. As equações volumétricas ajustadas pelo modelo de Schumacher e Hall forneceram estimativas precisas para povoamentos de *C. spruceanum* para as diferentes idades. Este modelo, que utiliza dap e altura total como variáveis independentes, é um dos mais utilizados para estimativas de volume do fuste na área

florestal. Na Floresta Nacional Tapirapé-Aquiri no estado do Pará, foram testados doze modelos volumétricos e o modelo de Schumacher e Hall foi apresentado como sendo o mais adequado (Rolim et al., 2006). Este modelo também apresentou maior precisão para floresta Ombrófila Aberta no estado de Mato-Grosso (Colpini et al., 2009) e em Paragominas-Pará (Silva e Santana, 2014). No presente estudo, mediante o ajuste de apenas um modelo volumétrico já foi possível obter resultados satisfatórios, mas nem sempre isso é possível. Thomas et al. (2006) concluem que apesar da eficiência de alguns modelos, estes nem sempre se ajustam para todas as espécies e condições. Desta forma, é recomendável sempre testar o maior número de modelos e identificar o melhor para cada caso específico.

Para os povoamentos de *C. spruceanum* deste estudo, os resultados alcançados por meio das RNA se devem às suas características intrínsecas que as tornam adequadas para solucionar diferentes problemas. Foi mostrado que as RNA resultaram em estimativas precisas para o volume individual similares àquelas obtidas pelo modelo de Schumacher e Hall. De acordo com os resultados de Özçelik et al. (2014), modelos de regressão não-lineares foram menos precisos do que os três tipos de modelos de redes neurais testados tanto para diâmetro com casca quanto para estimativas de volume do fuste de pinus baseado no erro padrão da estimativa. Gorgens et al. (2009), Silva et al. (2009), Binoti et al. (2014) verificaram a capacidade de generalização das RNA e quando comparado ao modelo de Schumacher e Hall ao estimar o volume os autores concluíram que as RNA apresentaram boa precisão para estimativas dos volumes, sendo possível usar os dois métodos.

No presente estudo, foram obtidos bons ajustes utilizando oito neurônios na camada intermediária e algoritmo *Resilient propagation*. Binoti et al. (2014) propõem diversas formas de RNA com variações, principalmente no número de neurônios por camada, tipo de função de ativação dos neurônios, número de camadas ocultas e tipo de conexão entre os neurônios. Outro fator que pode interferir no tempo de treinamento e na eficiência de uma rede são os algoritmos utilizados, bem como os parâmetros e coeficientes utilizados em seu treinamento. Gorgens et al. (2014) sugerem a utilização de redes com 10 ou mais neurônios na primeira camada intermediária para problemas de aproximação de funções de estimativa de volume de árvores.

O pau-mulato é uma espécie que tem como característica marcante o fuste reto e com poucas bifurcações, o que é um diferencial no mercado, pois resulta em melhor aproveitamento da madeira. Ao comparar os resultados dos diâmetros ao longo do fuste estimados pelo modelo de Garay com aqueles gerados pelas redes, observou-se pouca diferença nas estatísticas de precisão, o que demonstra que as estimativas geradas pelas redes

neurais foram próximas às geradas pelo modelo. Tais resultados evidenciam a possibilidade de simplificação dos procedimentos a serem seguidos para quantificação de multiprodutos da madeira. Ao contrário das RNA, o emprego de equações de afilamento demanda maior número de árvores abatidas, levando a um maior custo. Além disso, caso se opte em empregar o modelo de Garay, será mais adequado ajustar uma equação por idade, ao passo que apenas uma RNA é capaz de gerar estimativas para todos os casos.

Basicamente, as funções de afilamento possuem três aplicações: estimar um diâmetro à qualquer altura, estimar uma altura com um diâmetro correspondente e, segundo Téó et al. (2013), a vantagem das funções de afilamento é poder estimar o volume de qualquer porção do fuste. A obtenção de estimativas eficientes para um diâmetro comercial pré-definido permite auxiliar nas decisões de manejo e no planejamento econômico do povoamento.

Entre os modelos convencionais de regressão do presente trabalho, o modelo de Garay é o mais indicado para estimar diâmetro ao longo do fuste de árvores de *C. spruceanum* com idades entre 60 e 120 meses. Leite et al. (2006) também selecionaram o modelo de Garay para estimar o perfil do fuste de *Virola surinamensis*, tendo sido obtidas estimativas precisas e livres de viés. Nogueira et al. (2008) analisaram o efeito do espaçamento na forma dos fustes de árvores de *Pinus taeda* L. e concluíram que o modelo de afilamento de Garay foi o mais indicado e que espaçamentos menores resultam em forma menos cônica que os maiores. Leite et al. (2011), avaliando três modelos de afilamento, Demaerschalk (1972), Garay (1979) e Ormerod (1973), visando descrever o perfil do cerne e do fuste de árvores de *Tectona grandis* L.f., observaram que o modelo de Garay foi eficiente para estimar o afilamento do fuste com e sem casca e o afilamento do cerne.

Uma característica do modelo proposto por Garay é o fato da expressão permitir estimar altura comercial e não super ou subestimar a altura para árvores de menores dimensões. Além disso, o modelo de Garay é derivado da função Richards e possui flexibilidade para descrever as variações do afilamento em árvores de diferentes espécies e tamanhos de árvores, além de ser consistente em relação às variáveis diâmetro, altura e volume (Leite et al., 2006).

O estudo da forma do fuste de árvores é realizado por meio de modelos de regressão, alguns já consagrados, porém não há uma função que seja eficiente para todos os casos, uma vez que diversos fatores como material genético, a idade, o espaçamento, regime de corte e desbaste, regime de condução e o sítio (Nogueira et al., 2008; Queiroz et al., 2008), o que leva vários pesquisadores a desenvolver e aplicar diferentes técnicas de modelagem do perfil do fuste para diferentes condições. Pires e Calegário (2007) ajustaram modelos lineares e não

lineares para a descrição do perfil de árvores e concluíram que o modelo não linear logístico modificado foi o melhor por apresentar características desejáveis como a parcimônia (evita o excesso de parâmetros), interpretação dos parâmetros e extrapolação do modelo. Mendonça et al. (2007) avaliando quatro funções de afilamento na estimativa do volume e da altura ao longo do fuste visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* sp. para multiprodutos verificaram que o modelo de Ormerod apresentou melhores estimativas de volume e o modelo de Schoepfer foi mais adequado para a altura. Yoshitani Junior et al. (2012) ajustaram funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda* e concluíram que as equações polinomiais de Shöepfer e Hradetzky propiciam estimativas precisas do diâmetro e volume. Lansanova et al. (2013) ajustaram cinco modelos de afilamento do fuste de espécies comercialmente exploradas na Amazônia Mato-grossense e constataram que o modelo de Demaerschalk adaptado teve melhor desempenho para estimar diâmetro ao longo do fuste, no entanto, as funções de afilamento demonstraram dificuldade para estimar diâmetros da parte superior do fuste.

Do ponto de vista socioeconômico e ecológico, sabe-se que *C. spruceanum* é uma espécie promissora no contexto de produção de madeira em ambiente de várzea com alto potencial de propiciar às famílias ribeirinhas uma fonte de renda alternativa. Neste sentido, as pesquisas desenvolvidas pelo projeto Florestam vêm subsidiando a formulação de políticas públicas para o setor florestal no Amapá. Por exemplo, foi recentemente regulamentado a exploração de florestas nativas e formações sucessionais de domínio público e privado por meio do Decreto 3325 (GEA, 2013). Tal Decreto estabelece que os planos de manejo para áreas de várzea permitam o desbaste para fins comerciais de *C. spruceanum*, quando apresentarem densidades superiores a 100 indivíduos por hectare e dap entre 10 e 30 cm. Os resultados apresentados pelo presente estudo trazem informações significativas referentes às variáveis dendrométricas (altura, volume e afilamento) da espécie e que poderá certamente contribuir para o seu manejo.

CONCLUSÃO

As redes neurais artificiais resultam em estimativas tão precisas quanto os modelos tradicionais de regressão para as três variáveis dendrométricas analisadas neste estudo. No entanto, as RNA têm como vantagem a flexibilidade de inserção de mais variáveis explicativas simultaneamente, como a idade do povoamento. Esta variável apresentou um efeito significativo nas estimativas dos modelos de regressão.

REFERÊNCIAS

- Araújo, E.J.G.; Pelissari, A.L.; David, H.C., Scolforo, J.R.S.; Netto, S.P.; Moraes, V.A. 2012. Relação hipsométrica para candeia (*Eremanthus erythropappus*) com diferentes espaçamentos de plantio em Minas Gerais, Brasil. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 32(71): 257-268.
- Almeida, M.C. 2004. Pau mulato da várzea: *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook.f.ex K. Schum. *Informativo Técnico da Rede de Sementes da Amazônia*. Manaus, nº 6. 2p.
- Applegate, B.T.S.; Zarin, D.J.; Rabelo, F.G. 2000. Log and sawn lumber volume relationships for *Calycophyllum spruceanum*: a naturally regenerating timber source from Amazonian tidal floodplain forests Amapá – Brazil. *Revista de Ciências Agrárias*, 33: 77-86.
- Azevedo, C.P.; Muroya, K.; Garcia, L.C.; Lima, R.M.B.; Moura, J. B.; Neves, E.J.M. 1999. Relação hipsométrica para quatro espécies florestais em plantio homogêneo e em diferentes idades na Amazônia ocidental. *Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo*, 39: 5-29.
- Barreto, P; Amaral, P.; Vidal, E.; Uhl, C. 1998. Custos e Benefícios do Manejo Florestal para Produção de Madeira na Amazônia Oriental. Belém, PA: Imazon. 46p. (*Série Amazônia*, nº10).
- Bartoszeck, A.C.P.S.; Machado, S.A.; Figueiredo Filho, A.; Oliveira, E.B. 2004. A distribuição diamétrica para bracingais em diferentes idades, sítios e densidades na região metropolitana de Curitiba. *Floresta*, 34(3): 517-533.
- Batista, J.L.F.; Couto, H.D.; Marquesini, M. 2001. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta. *Scientia forestalis*, 60: 149-163.
- Braga, P.A.; Carvalho, A.; Ludemir, T. 2007. Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações, Livro Técnico e Científico, 2ª ed. Rio de Janeiro. 260p.
- Binoti, M.L.M.S. 2010. *Redes Neurais Artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto*. Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 54p.
- Binoti, D.H.B. 2012. *Sistemas computacionais aplicados ao manejo florestal*. Tese de Doutorado em ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 122p.
- Binoti, M.L.M.S.; Binoti, D.H.B.; Leite, H.G. 2013. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. *Revista Árvore*, 37(4): 639-645.
- Binoti, D.H.B.; Binoti, M.L.M.D.S.; Leite, H.G. 2014. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 5(1): 58-67.
- Braga, A.P.; Carvalho, A.P.L.F.; Ludermir, T.B. 2007. Redes neurais artificiais - Teoria e aplicações. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 226p.

- Bullinaria, J.A. 2014. Introduction to Neural Computation. (www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html). Acesso em 13/10/2014.
- Canakci, A.; Ozsahin, S.; Varol, T. 2012. Modeling the influence of a process control agent on the properties of metal matrix composite powders using artificial neural networks. *Powder Technology*, 228: 26-35.
- Campos, J.C.C.; Leite, H.G. 2013. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 4ª ed, UFV. 605p.
- Castellanos, A.; Martinez Blanco, A.; Palencia, V. 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, 14: 218-222.
- Castilho, N. T. 2013. *Manejo da regeneração natural e produção de madeira de pau-mulato em floresta de várzea do estuário amazônico*. Dissertação de Mestrado em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá, Macapá, Amapá. 96p.
- CeluloseOnline. 2015. (www.celuloseonline.com.br/excluviso-redes-neurais-artificiais-e-imagens-de-satelite-sao-ferramentas-utilizadas-para-medir-sustentabilidade-da-fibria-entenda). Acesso em: 25/02/2015.
- Ceylan, I. 2008. Determination of drying characteristics of timber by using artificial neural networks and mathematical models. *Drying Technology* 26(12): 1469-1476.
- Chichorro, J.F.; Resende, J.L.P.; Leite, H.G. 2003. Equações de volume e de taper para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. *Revista Árvore*, 27(6): 799-809.
- Colpini, C.; Travagin, D.P.; Soares, T. S.; Silva, V. S. M. 2009. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. *Acta Amazonica*, 39(1): 97-104.
- Corne, S.A.; Carver, S.J.; Kunin, W.E.; Lennon, J.J.; Hess, W.W.S. 2004. Predicting forest attributes in southeast Alaska using artificial neural networks. *Forest Science*, 50(2): 259-276.
- Demaerschalk, J.P. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3): 241-245.
- De Simone, O; Junk, W.J.; Schmidt, W. 2003. Central Amazon Floodplain Forests: Root Adaptations to Prolonged Flooding. *Russian Journal of Plant Physiology*, 50: 848-855.
- Diamantopoulou, M.J. 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Oxon, 48: 235-244.
- Diamantopoulou, M.J. 2012. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2: 190-197.

Diamantopoulou, M.J. R. Özçelik. 2012. Evaluation of different modeling approaches for total tree-height estimation in Mediterranean Region of Turkey. *Forest Systems*, 21(3): 383-397.

D'Oliveira, M.V.N. 1989. *Regeneração natural de uma floresta de várzea explorada por método tradicional, no Paraná Abufarí no Médio Rio Purús*. . Dissertação de Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 75p.

D'Oliveira, M.V.N.; Mendes, L.M.S.; Silveira, G.S. 1992. Estudo do mulateiro, (*Calycophyllum spruceanum* Benth.) em condições de ocorrência natural em plantios homogêneos. *Boletim de Pesquisa*. EMBRAPA/CPAF-ACRE, Rio Branco, nº 8.

Favalessa, C.M.C.; Ubialli, J.A.; Caldeira, S.F.; Drescher, R. 2012. Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas para *Tectona grandis* na região centro-sul matogrossense. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 32(72): 373-388.

Ferreira, C.S.; Figueira, A.V.O.; Gribel, R.; Wittmann, F.; Piedade, M.T.F. 2010. Genetic variability, divergence and speciation in trees of periodically flooded forests of the Amazon: a case study of *Himatanthus sucuuba* (Spruce) Woodson. *Ecological Studies*, 210: 301-312.

Garay, L. 1979. *Tropical forest utilization system*. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seatlhe. Coll. Forest. Resour., Inst. Forest Prod. Univ. Wash. 64p.

Garcia, S.L.R.; Leite, H.G.; Yared, J.A.G. 1993. Análise do perfil do tronco de morototó (*Didymopanax morototonii*) em função do espaçamento. In: *Congresso florestal panamericano e congresso florestal brasileiro*, 1993, Curitiba. Anais. Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura e Sociedade Brasileira de Engenheiro Florestais, 2: 485-491.

Gazel Filho, A.B.; Yared, J.A.G.; Mourão Júnior, M.; Silva, M.F.; Carim, M.J.V.; Jardim, M.A.G.; Medeiros, T.D.S. 2008. Composição florística e estrutura de floresta de várzea no município de Mazagão, estado do Amapá, Brasil. *Scientia Forestalis*, 36(79): 191-201.

Gonzáles, J.C.D. 2007. Promotion of natural regeneration to establish productive managed Forest on Fallow land near Pucallpa, In the Peruvian Amazon. Tese de Doutorado, Universidade Albert Ludwig de Friburgo, Alemanha. 143p.

Gorgens, E.B.; Leite, H.G.; Santos, H.N.; Gleriani, J.M. 2009. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 33(6): 1141-1147.

Gorgens, E.B.; Leite, H.G.; Gleriani, J.M.; Soares, C.P.B.; Ceolin, A. 2014. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 38(2): 289-295.

Governo do Estado do Amapá. 2013. *Decreto nº 3325 de 17 de junho de 2013*. Regulamenta a exploração de florestas nativas e formações sucessoras de domínio público e privado, inclusive em reserva florestal legal no estado do Amapá e dá outras providências. 58p.

Guedes, M.C.; Castilho, N.T.; Miranda, D.; Fischer, G.; Sousa, M. Zaharya, N.; Mochiutti, S. 2012. Regeneração do pau-mulato: Manejo para uso sustentável da várzea. *Documento técnico*. Embrapa Amapá.

Guimarães, M.A.; Calegário, N.; Carvalho, L.M.T.D.; Truguilho, P.F. 2009. Height-diameter models in forestry with inclusion of covariates. *Cerne*, 15(3): 313-321.

Gujarati, D.N.; Porter, D.C. 2011. *Econometria Básica*. 5ª ed. McGraw-Hill, Brasil, 846p.

Haykin, S. 2001. *Redes Neurais: princípios e prática*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 900p.

Hanewinkel, M. 2005. Neural networks for assessing the risk of windthrow on the forest division level: a case study in southwest Germany. *European Journal of Forest Research*, New York, 124(3): 243-249.

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

Husch, B.; Miller, C.I.; Beers, T.W. 1972. *Forest mensuration*. 2ª ed. New York: The Ronald Press Company, 410p.

Hyams, D. CurvExpert 1.4. Microsoft Corporation, 1993. Disponível em: (www.curveexpert.net/curveexpert-basic). Acesso em 11/2014.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2012. Manual técnico da vegetação brasileira. 2ª ed. Rio de Janeiro, 271p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2013. Área territorial brasileira: consulta por unidades da federação. (www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm). Acesso em: 20.02.2014

Kozak, A.; Munro, D.D.; SMITH, J.H.G. 1969. Taper functions and their application in Forest inventory. *Forestry Chronicle*, 45(4): 278-283.

Jong, W. 2001. Tree and forest management in the floodplains of the Peruvian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 150: 125-134.

Junk, W.J. 1997. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. The central Amazon floodplain: ecology of a pulsating system. *Ecological Studies*, Vol. 126 (ed. by W.J. Junk), pp. 3–22. Springer, Berlin.

Lansanova, L.R.; Ubialli, J.A.; Arce, J.E.; Pelissari, A.; Favalessa, C.M.; Drescher, R. 2013. Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do bioma amazônico mato-grossense. *Floresta*, 43(2): 215-224.

Leduc, D.J.; Matney, T.G.; Belli, K.L.; Junior, V.C.B. 2001. Book, Online. *Predicting diameter distributions of longleaf pine plantations U.S.* Dept. of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, 18p.

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

Leite, H.G.; Gama, J.R.V., Cruz, J.P.D., Souza, A.L.D. 2006. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) Warb. *Revista Árvore*, 30(1): 99-106.

Leite, H.G.; Oliveira-Neto, R.R.; Monte, M.A.; Fardin, L.; Alcantara, A.M.; Binoti, M.L.M.S.; Castro, R.V.O. 2011. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. *Scientia Florestalis*, 39(89): 53-59.

Leite, H.G.; Silva, M.L.M.; Binoti, D.H.B.; Fardin, L.; Takizawa, F.H. 2011. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. *European Journal of Forest Research*, 130(2): 263-269.

Lima, R.B.; Aparício, P.S.; Ferreira, R.L.C.; Silva, W.C.; Guedes, M.C.; Oliveira, C.P.; Silva, D.A.S.; Batista, A.P.B. 2014. Volumetria e classificação da capacidade produtiva para *Mora paraensis* (Ducke) no estuário amapaense. *Scientia Florestalis*, 42(101): 141-154.

Lorenzi, H. 1992. *Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil*. Nova Odessa: Plantarum, 368p.

Machado, S.A.; Filho, A.F. 2003. *Dendrometria*. Curitiba. 2ª ed., 309p.

Machado, S.A.; Conceição, M.B.; Figueiredo, D.J. 2002. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 4(2): 185-197.

Machado, S.A.; Nascimento, R.G.M.; Augustynczyk, A.L.D., Silva, L.C.R., Figura, M. A.; Pereira, E.M.; Téó, S.J. 2008. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 56: 5-16.

Mendonça, A.R.; Silva, G.F.; Oliveira, J.T.S.; Nogueira, G.S.; Assis, A.L. 2007. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* sp. para multiprodutos. *Cerne*, 13(1): 71-82.

NeuroForest. Binoti, D. H. B.; Binoti, M. L. M. S.; Leite, H. G.; Lopes, P. F. versão 3.2. (www.neuroforest.ucoz.com). Acesso em: 13/10/2014.

Nogueira, S.N.; Leite, H. G.; Reis, G. G.; Moreira, A.M. 2008. Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, 32(5): 855-860.

Ormerod, D.W. 1973. A simples bole model. *The Forestry Chronicle*, 49(3): 136-138.

Özçelik, R.; Diamantopoulou, M.J. Brooks, J.R.; Wiant Jr, H.V. 2010. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 91: 742-753.

Özçelik, R.; Diamantopoulou, M.J.; Brooks, J.R. 2014. The use of tree crown variables in over-bark diameter and volume prediction models. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(3): 132-139.

Parolin, P.; Ferreira, L.V.; Albernaz, A.L.K.M.; Almeida, S.S. 2004. Tree Species Distribution in várzea forests of Brazilian Amazonia. *Folia Geobotanica*, 39(4): 371-383.

Parolin, P. 2012. Diversity of adaptations to flooding in trees of Amazonian floodplains. *Revista Pesquisas-Botânica*, 63: 7-28.

Peng, C.; Wen, X. 1999. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. *American Association for Artificial Intelligence*. 8p.

Piedade, M.T.F.; Schöngart, J.; Wittmann, F.; Parolin, P.; Junk, W. 2013. Impactos da inundação e seca na vegetação de áreas alagáveis amazônicas. In: Borma, L.S.; Nobre, C. (Org.). Secas na Amazônia: causas e consequências. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, 268-305.

Pires, L. M.; Calegário, N. 2007. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. *Árvore*, 31(5): 845-852.

Prance, G.T., 1979. Notes on the vegetation of Amazonia III. The terminology of Amazonian forest types subject to inundation. *Brittonia* 3(1): 26-38.

Queiroz, D.; Machado, S.A.; Figueiredo Filho, A.; Arce, J.E.; Koehler, H.S. 2008. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. *Floresta*, 38(2): 339-349.

Queiroz, J.A.L.; Machado, S.A. 2007. Potencial da utilização madeireira de espécies florestais de várzea no município de Mazagão no Estado do Amapá. *Revista Floresta*, 37(2): 293-302.

Rabelo, B.V. (coordenador); Equipe técnica do programa zoneamento ecológico econômico do estado do Amapá. 2008. Macrodiagnóstico do Estado do Amapá primeira aproximação do ZEE. 3. ed. Macapá: IEPA-COT-ZEE. 139p.

Regazzi, A.J. 2003. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. *Revista Ceres*, 50(287): 9-26.

Regazzi, A.J.; Silva, C.H.O. 2010. Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear em dados de experimento com delineamento em blocos casualizados. *Revista Ceres*, 57(3): 315-320.

Rolim, S.G.; Couto, H.D.; Jesus, R.D.; França, J. T. 2006. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). *Acta Amazonica*, 36(1), 107-114.

Rodrigues, E.F.; Oliveira, T.R.; Madruga, M.R.; Silveira, A.M. 2010. Um Método para determinar o Volume Comercial do *Schizolobium Amazonicum* (Huber) Ducke utilizando Redes Neurais Artificiais. *Revista Brasileira de Biometria*, 28(1): 16-23.

Santos, V. F.; Tardin, A.T. 2003. Projeto zoneamento ecológico-econômico do setor costeiro estuarino do estado do Amapá: diagnóstico sócio-ambiental, relatório técnico de solos. Macapá: IEPA. 22p.

Schumacher, F.X.; Hall, F.S. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9): 719-734.

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

Silva, J.N.M.; Araújo, S.M. 1984. Equação de volume para árvores de pequeno diâmetro, na Floresta Nacional do Tapajós. *Boletim de pesquisa florestal*, 8(9).

Silva, U.R.L.; Takiyama, L.R.; Silva, S.L.F. 2006. Atlas da Zona Costeira Estuarina do Amapá: do Diagnóstico Socioambiental ao Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro Participativo. Macapá: Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Amapá.

Silva, M.L.M.; Binoti, D.H.B.; Gleriani, J.M.; Leite, H.G. 2009. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, 33(6): 1133-1139.

Silva, E.N.; Santana, A.C.; Queiroz, W.T.; Souza, R.J. 2011. Estimação de equações volumétricas para árvores de valor comercial em Paragominas, estado do Pará. *Amazônia: Ciência & Desenvolvimento*, Belém, 7(13): 7-18.

Silva, A.C.; Higuchi, P.; Van Den Berg, E.; Nunes, M.H.; Carvalho, D.A. 2012. *Florestas inundáveis*: ecologia, florística e adaptações das espécies. Lavras: Ed. UFLA.

Silva, G.F.; Curto, R.D.A.; Soares, C.P.B.; Castro Piassi, L. 2012. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. *Revista Árvore*, 36(2): 341-348.

Silva, E. N.; Santana, A.C. 2014. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. *Revista Ceres*, 61(5): 631-636.

Soares, F.A.A.M.N.; Flôres, E.L.; Cabacinha; C.D.; Carrijo, G.A.; Veiga, A.C.P. 2012. Recursive diameter prediction for calculating merchantable volume of *Eucalyptus* clones without previous knowledge of total tree height using artificial neural networks. *Applied Soft Computing*, 12(8): 2030-2039.

Soares, C.P.B.; Martins, F.B., Leite Junior, H.U.; Silva, G.F.D.; Figueiredo, L.T.M.D. 2011. Equações hipsométricas, volumétricas e de taper para onze espécies nativas. *Revista Árvore*, 35(5): 1039-1051.

Soares, C.P.B.; Paula Neto, F.; Sousa, A.L. 2012. *Dendrometria e inventário Florestal*. Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 272p.

Sotelo-Montes, C.; Weber, J.C. 1997 Priorización de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la selva baja del Perú. *Agroforestería en las Américas*, 4: 12-17.

Sotelo-Montes, C.; Vidaurre, H.; Weber, J.C. 2003. Variation in stem-growth and branch-wood traits among provenances of *Calycophyllum spruceanum* Benth. from the Peruvian Amazon. *New Forests*, 26(1): 1–16.

Statsoft. Statistica (data analysis software system), version 10. StatSoft, Inc., 2012.

Téo, S.J.; Marcon, A.; Ehlers, T.; Bianchi, J.C.; Peloso, A.; Nava, P.R.; Costa, R.H. 2013. Modelos de afilamento para *Pinus elliottii* em diferentes idades, na região de Caçador, SC. *Floresta*, 43(3): 439-452.

Ter Steege, H.; Sabatier, D.; Castellanos, H., Van Andel, T.; Duivenvoorden, J.; Oliveira, A. A.; Ek, R.; Lilwah, R; Maas, P.; Mori, S. 2000. An analysis of the floristic composition and diversity of Amazonian forests including those of the Guiana Sield. *Journal of Tropical Ecology*, 11: 801-828.

Thomas, C.; Andrade, C.M.; Schneider, P.R.; Finger, C.A.G. 2006. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. *Ciência Florestal*, 16(3): 319-327.

Tiryaki, S.; Hamzacebi, C. 2014. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat treated woods by artificial neural networks. *Measurement* 49: 266–274.

Veríssimo, A.; Cavalcanti, A.; Vidal, E.; Lima, E.; Pantoja, F.; Brito, M. 1999. *O setor madeireiro no Amapá: situação atual e perspectivas para o desenvolvimento sustentável*. Governo do Estado do Amapá e Imazon, 46p.

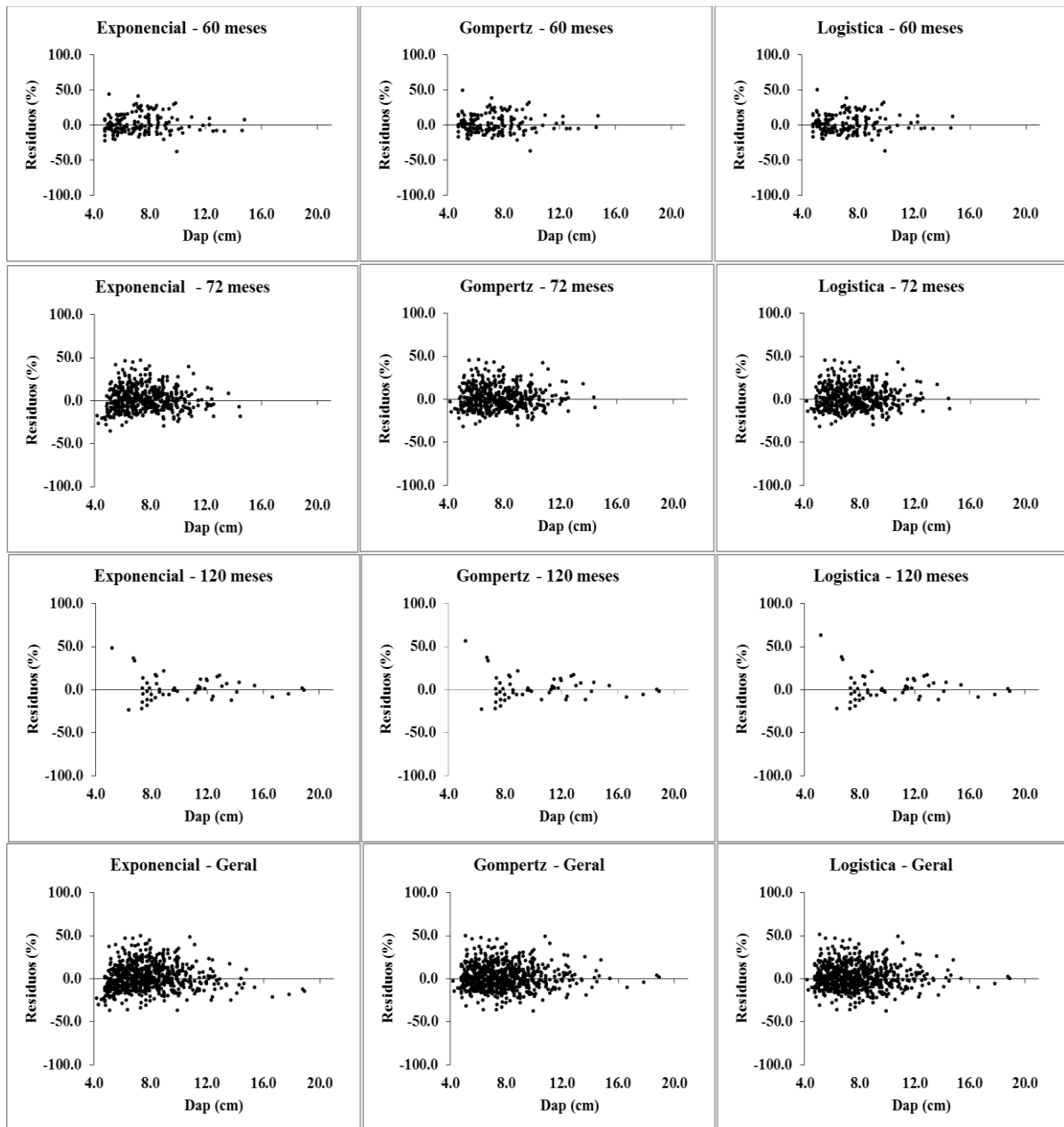
Wittmann, F.; Junk, W.J.; Piedade, M.T.F. 2004. The várzea forests in Amazônia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. *Forest Ecology and Management*, 196: 199-212.

Wittmann, F.; Schöngart, J.; Montero, J.C.; Motzer, T.; Junk, W.J.; Piedade, M.T.F.; Queiroz, H.L.; Worbes, M. 2006. Tree species composition and diversity gradients in white-water forests across the Amazon basin. *Journal of Biogeography*, 33: 1334-1347.

Yoshitani Junior, M.; Nakajima, N.Y.; Arce, J.E.; Machado, S.A.; Druszcz, J.P.; Hosokawa, R.T., Mello, A.A. 2012. Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. *Floresta*, 42(1): 169-176.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Resíduos das equações hipsométricas ajustadas para *C. spruceanum*, em nível geral e estratificadas por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.



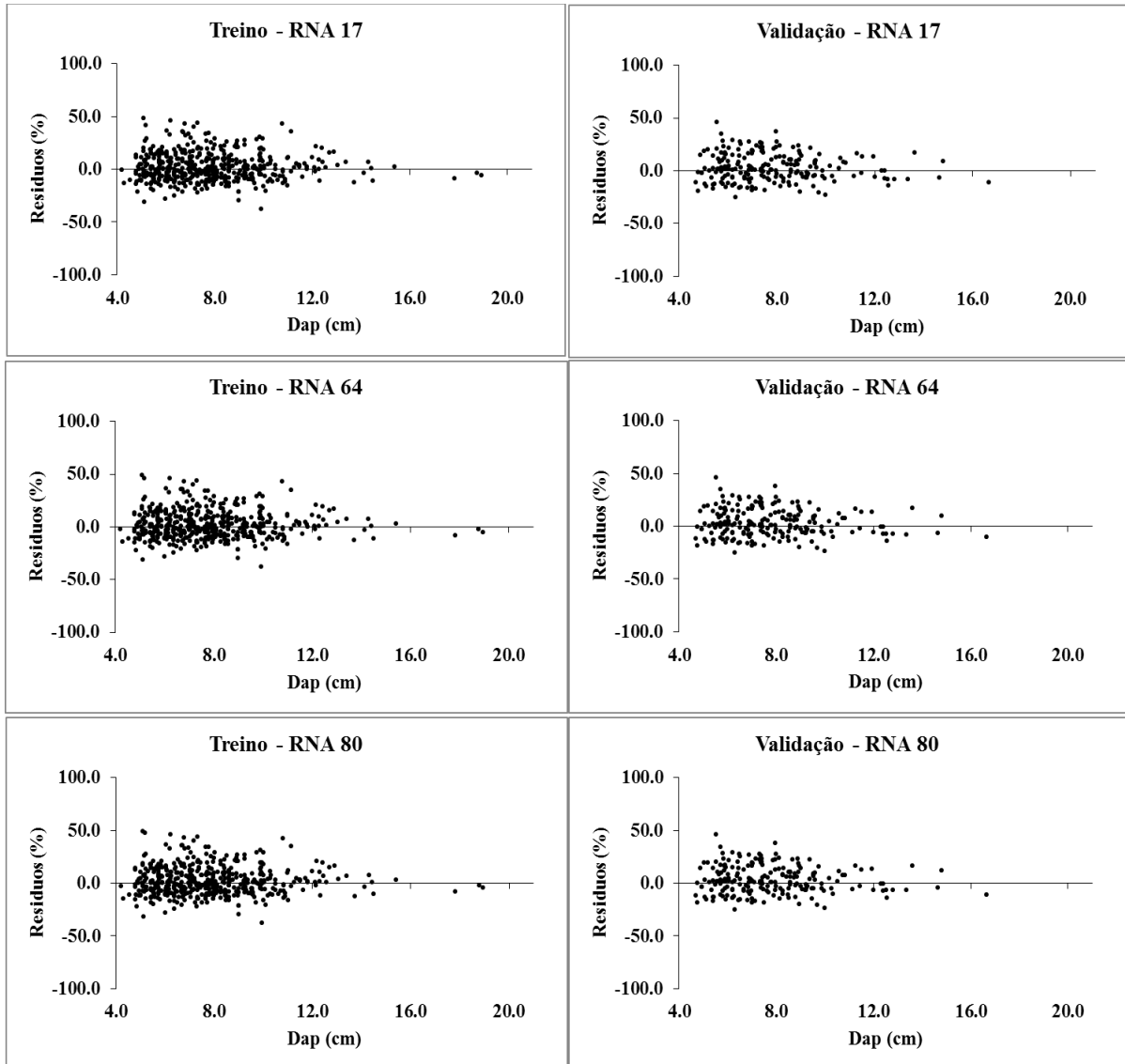
APÊNDICE B - Resultados do teste de identidade para os modelos hipsométricos, volumétricos e de taper.

Modelo	Categoria	QM _(R H0)	QM _(Residuo)	F _{calculado}	F _{tabelado}	p-valor
Exponencial	Altura	70.29	1.75	40.28	2.38	$2,57 \times 10^{-30}$
Gompertz	Altura	41.45	1.64	25.33	2.11	$3,27 \times 10^{-27}$
Logistica	Altura	41.43	1.64	25.30	2.11	$3,56 \times 10^{-27}$
Schumacher	Volume	0.00024	0.00006	4.21	2.11	$3,64 \times 10^{-4}$
Demaerschalk	Taper	10.2049	0.6935	14.72	1.94	$1,71 \times 10^{-21}$
Garay	Taper	4.5466	0.4022	11.30	1.94	$5,25 \times 10^{-16}$
Kozak	Taper	22.7301	0.5549	40.96	2.10	$4,31 \times 10^{-49}$
Ormerod	Taper	17.1081	0.7839	21.82	3.00	$3,63 \times 10^{-10}$

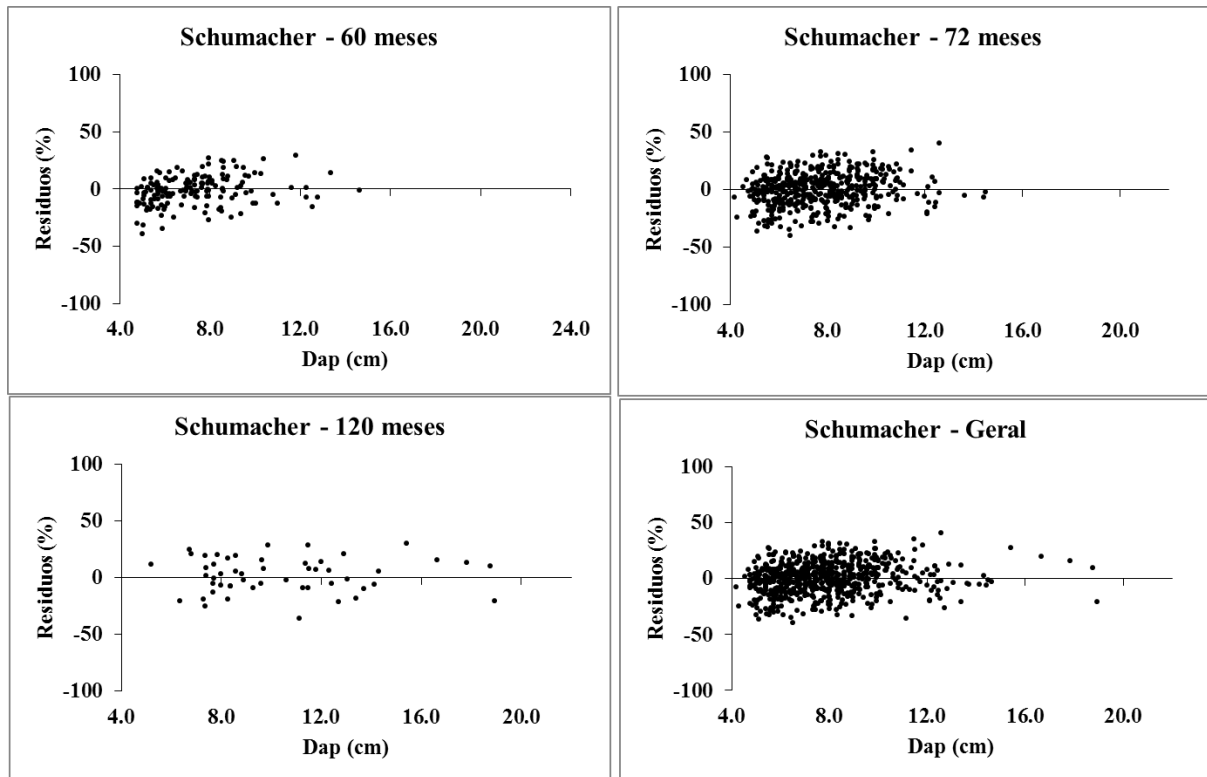
APÊNDICE C - Medidas de precisão das redes neurais artificiais ajustadas para altura de *C. spruceanum* em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Rede	Conjunto	R _{yy}	Bias	MDA	RQEM %
RNA17	Treino	0.8563	-0.0002	1.0023	12.7
	Validação	0.8574	-0.1190	0.9990	12.4
RNA64	Treino	0.8561	-0.0027	1.0025	12.7
	Validação	0.8581	-0.1221	0.9993	12.3
RNA80	Treino	0.8561	0.0031	1.0023	12.7
	Validação	0.8584	-0.1202	0.9982	12.3

APÊNDICE D - Resíduos do treinamento e validação das redes neurais artificiais ajustadas para altura de *C. spruceanum*, em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.



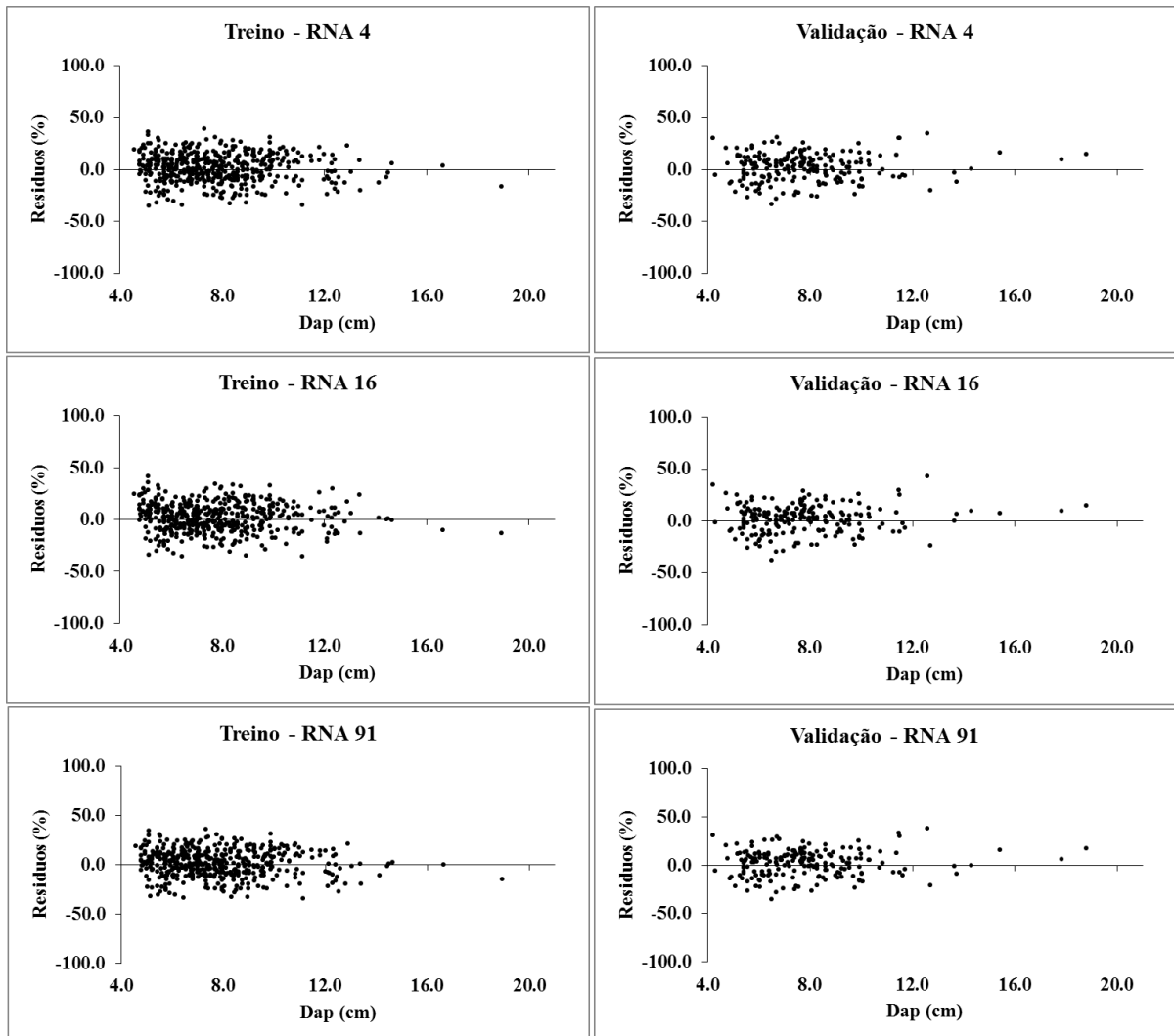
APÊNDICE E - Resíduos das equações volumétricas ajustadas para *C. spruceanum*, em nível geral e estratificadas por idade em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.



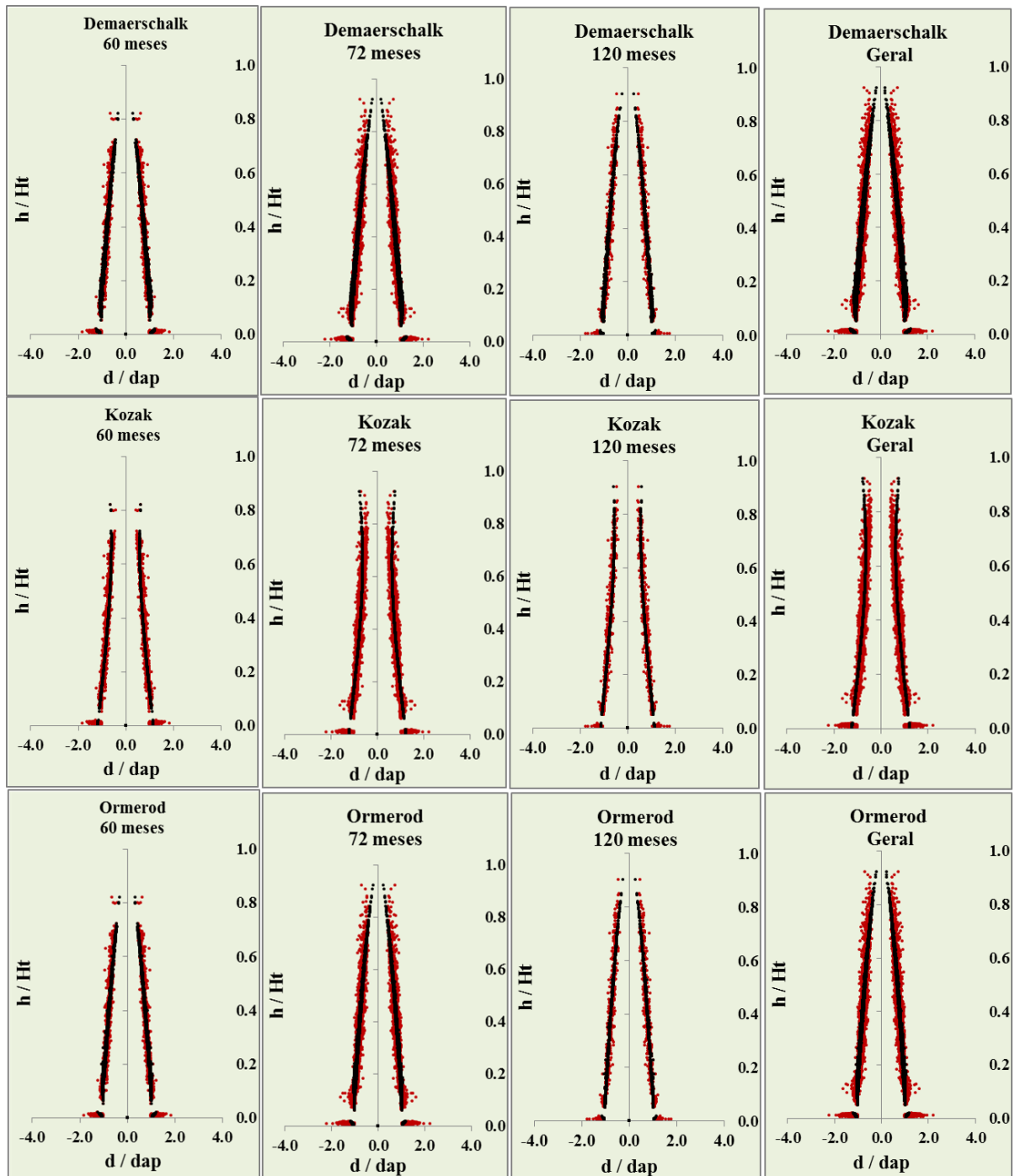
APÊNDICE F - Medidas de precisão das redes neurais artificiais ajustadas para volume de *C. spruceanum* em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Rede	Conjunto	R ² y	Bias	MDA	RQEM %
RNA4	Treino	0.9788	0.0005	0.0042	18.8
	Validação	0.9834	-0.0005	0.0039	18.0
RNA16	Treino	0.9789	0.0002	0.0041	18.3
	Validação	0.9839	-0.0006	0.0039	18.3
RNA91	Treino	0.9791	0.0005	0.0041	18.7
	Validação	0.9828	-0.0005	0.0039	18.3

APÊNDICE G - Resíduos do treinamento e validação das redes neurais artificiais ajustadas para volume de *C. spruceanum*, em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.



APENDICE H - Relação d/dap estimada e observada em função da relação h/Ht observada e estimada pelos modelos de afilamento de Demaerschalk, Kozak e Ormerod para *C. spruceanum*, em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.



APÊNDICE I - Medidas de precisão das redes neurais artificiais ajustadas para afilamento de *C. spruceanum* em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

Rede	Conjunto	R \hat{y} y	Bias	MDA	RQEM %
RNA10	Treino	0.9745	0.0034	0.3842	8.1
	Validação	0.9762	-0.0004	0.3741	7.6
RNA53	Treino	0.9739	-0.0004	0.3858	8.1
	Validação	0.9760	-0.0054	0.3753	7.6
RNA77	Treino	0.9723	0.0015	0.3992	8.4
	Validação	0.9745	-0.0057	0.3853	7.9

APENDICE J – Resíduos do treinamento e validação das redes neurais artificiais ajustadas para afilamento de *C. spruceanum*, em florestas de várzea nos municípios de Mazagão-AP e Gurupá-PA.

