



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

FÁBIO MIRANDA LEÃO

**VOLUME DE MADEIRA: DETERMINAÇÃO, AMOSTRAGEM E MÉTODOS DE
ESTIMATIVA**

BELÉM

2019

FÁBIO MIRANDA LEÃO

**VOLUME DE MADEIRA: DETERMINAÇÃO, AMOSTRAGEM E MÉTODOS DE
ESTIMATIVA**

Tese final apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Ciências Florestais, para obtenção do título de **Doutor**.
Área de concentração: Ciências florestais.

Orientadora:
Profa. Dra. Izildinha de Souza Miranda

Co-orientadores:
Prof. Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento
Prof. Dr. Fabiano Emmert

BELÉM

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L433v Leão, Fábio Miranda

Volume de madeira : determinação, amostragem e métodos de estimativa / Fábio Miranda Leão. - 2019.
104 f.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Izildinha de Souza Miranda

Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento e Prof. Dr. Fabiano Emmert.

1. Árvores - modelagem volumétrica. 2. Espécies florestais da Amazônia. 3. Redes neurais artificiais.
4. Cubagem. 5. Anapú - Pará - Brasil. I. Miranda, Izildinha de Souza, *orient.* II. Título

CDD: 582.1609811


FÁBIO MIRANDA LEÃO

**VOLUME DE MADEIRA: DETERMINAÇÃO, AMOSTRAGEM E MÉTODOS DE
ESTIMATIVA**

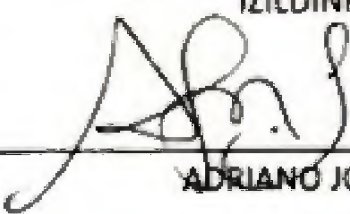
Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Ciências Florestais, para obtenção do título de **Doutor**. Área de concentração: Ciências Florestais

Data da aprovação: 21/02/2019


BANCA EXAMINADORA



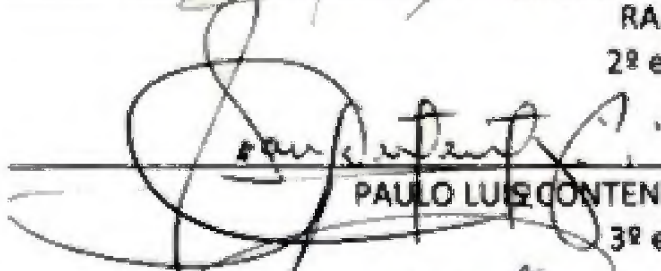
IZILDINHA SOUZA MIRANDA
Presidente




ADRIANO JOSÉ NOGUEIRA LIMA
1º examinador



RAFAEL RODE
2º examinador



PAULO LUIS CONTENTE BARROS
3º examinador



LUIZ GONZAGA SILVA COSTA
4º examinador

Dedico,

À minha família, por embarcar comigo
nessa minha jornada de ser um professor
doutor e cientista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Grande Arquiteto do Universo, pois sem ele nada seria possível. Agradeço à comunidade do Projeto de Desenvolvimento Sustentável (PDS) Virola-Jatobá e à Fazenda Arataú, pela oportunidade de fazer pesquisa em suas áreas.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), pela oportunidade de me formar como Doutor em Ciências Florestais.

Agradeço à minha orientadora, Izildinha de Souza Miranda, por me guiar nesse doutorado com muito esmero, afeto e confiança.

Agradeço aos meus co-orientadores, Rodrigo Geroni e Fabiano Emmert, pelo grande conhecimento a mim repassado, pela grande paciência e pela amizade.

Agradeço à minha esposa Karine por cuidar de mim e ter muita paciência, principalmente nos momentos difíceis, onde sempre me aconselhava e me acalmava com muito amor e carinho.

Agradeço a minha filha Anny Ketryn por toda a paciência e compreensão.

Agradeço aos meus pais Tom Menezes, Telma e Selma Leão e ao meu irmão Victor Leão, por todo apoio, amor e por serem tão presentes na minha vida. A vocês eu devo a minha vida.

Agradeço aos irmãos maçons da Estrela da Amazônia nº 35, pelo respeito, compreensão e incentivo.

Agradeço aos meus amigos do grupo de pesquisa BIOAMA: Mariana, Jéssica, Igor, Graciliano e Talita, agradeço também aos meus colegas do Lab. Florestal, vocês foram fundamentais para minha formação.

Agradeço aos meus amigos da COEO, pela amizade e momentos de descontração.

Agradeço aos meus amigos Rafael Prado, Lucas e Duda, pela amizade e parceria.

Agradeço aos demais familiares Camila, Mônica, Tia Rossi, Tio Junior, Mel, Tio Geraldo, Wagner e Vanessa, pela compreensão e apoio incondicional.

RESUMO

Buscar estratégias para estabelecer a melhor prática de determinação do volume, o melhor método de modelagem e o número mínimo de amostra para compor uma equação volumétrica robusta é importante para o manejador, pois gera informações confiáveis acerca do estoque volumétrico florestal. Neste sentido o objetivo desta tese foi buscar estratégias que possam melhorar a qualidade do ajuste de modelos estatístico para estimar o volume de árvores em pé no sudeste do Pará. A estimativa do volume foi estudado a partir de três análises: a primeira análise foram levantados três objetivos: o primeiro foi comparar as três práticas de medição dos volumes de árvores (volume real, volume aproveitável e volume geométrico); o segundo foi verificar a influência das espécies e das classes diamétricas na composição do volume de madeira obtido pelas três práticas de medição do volume; e por último foi quantificar as perdas volumétricas após o corte das árvores em uma unidade de manejo florestal em Anapu-PA. Para isso foram analisadas 53 árvores-amostra pertencentes a cinco espécies, separadas em três classes diamétricas; foi realizada uma ANOVA em esquema fatorial (5x3x3) para verificar o efeito das espécies, das classes diamétricas e práticas de medição, sobre os diferentes volumes obtidos. O volume geométrico em média foi menor que volume real para todas as espécies nas diferentes classes, não havendo diferença entre as médias do volume aproveitável e o volume real. A segunda análise buscou determinar o número mínimo de árvores a serem cubadas para seis espécies em Novo Repartimento-PA. Foram cubadas 318 árvores-amostra pertencentes a seis espécies. Para determinar o mínimo de árvores-amostra, foram realizadas 1000 simulações aleatórias, para tamanhos de amostra diferentes (4, 5, ..., n - 1). Em cada simulação, foram ajustados os modelos volumétricos de Husch e Schumacher-Hall e obtidos o Índice de Confiabilidade (IC%) e o Limite de Erro admissível (LEa%), para cada tamanho de amostra. Para o LEa%, foram considerados seis limites variando entre 10 e 35%. O teste t, foi utilizado para comparar a média do LEa% com a média do IC%, para cada tamanho de amostra, quando o IC% foi menor que o LEa% este foi considerado o ponto de árvores-amostra mínima. Para o modelo de Schumacher-Hall, a um limite de erro de 20%, são necessárias 29 árvores-amostra por espécie e 81 para todas espécies. Para o modelo de Husch, a 35% de limite, são necessárias 39 árvores-amostra por espécie e 158 para todas espécies. A terceira análise buscou comparar a precisão volumétrica das diferentes formas de modelagem do volume de árvores (fator de forma 0,7, fator de forma estimado, regressão linear e redes neurais artificiais - RNA's), para diferentes tamanhos de árvores-amostra em Novo Repartimento-PA. Foram cubadas 681 árvores-amostra, pertencentes a 52 espécies,

posteriormente foram selecionadas aleatoriamente do total árvores de árvores cubadas para compor diferentes tamanhos de amostra (25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300) para cada método de modelagem. Para análise da precisão dos modelos foi calculado o Erro padrão da estimativa, o critério de informação Bayesiano e o teste F de Graybill. A precisão e exatidão dos modelos foram analisadas; também foi realizado uma ANOVA fatorial (7 modelos x 8 tamanhos de amostra), para comparar o volume estimado pelos métodos nos diferentes tamanhos de árvores-amostras. Os melhores modelos em termos de precisão e exatidão foram Schumacher e Hall, ajustados a partir de 75 árvores-amostra, Husch, a partir de 150 árvores-amostra e as RNA's de dupla entrada, a partir 100 árvores-amostra. Uma análise das vantagens e desvantagens dos resultados de cada método foi elaborada e o modelo de Husch foi o recomendado.

Palavras-chave: Amostragem. Cubagem. Fator de forma. Modelagem. Regressão. Redes neurais artificiais.

ABSTRACT

Finding strategies to establish the best practice of volume determination, the best modeling method and the minimum number of samples to compose a robust volumetric equation is important for the manager since it generates reliable information about the volumetric forest inventory. In this sense, the objective of this thesis was to search for strategies that can improve the quality of the adjustment of statistical models to estimate the volume of standing trees in the southeast of Pará. The volume estimation was studied from three analyzes: the first analysis was raised three objectives: the first was to compare the three practices of measuring tree volumes (real volume, usable volume and geometric volume); the second one was to verify the influence of the species and the diameter classes in the composition of the volume of wood obtained by the three practices of volume measurement; and finally it was quantified the volumetric losses after the cutting of the trees in a forest management unit in Anapu-PA. Fifty-three sample-trees belonging to five species were analyzed in three diametric classes. A factorial (5x3x3) ANOVA was used to verify the effect of the species, diameter classes and measurement practices, on the different volumes obtained. The geometric volume presented, on average, less volume than the actual volume for all species in the different classes, with no difference between the averages of the commercial volume and the actual volume. The second objective aimed to determine the minimum number of trees required to estimate the volume for six species in Novo Repartimento-PA. A total of 318 sample-trees belonging to six species were measured. To determine the minimum number of sample-trees, 1000 random simulations were performed for different sample sizes (4, 5, ..., n-1). In each simulation, the Husch and Schumacher-Hall volumetric models were adjusted and the Reliability Index (IC%) and the Permissible Error Limit (LEa%) were obtained for each sample size. For the LEa%, we considered six limits varying between 10 and 35%. The t test was used to compare the mean LEa% with the mean IC%, for each sample size, when the IC% was lower than the LEa%, this was considered the minimum sample-tree point. For Schumacher-Hall, at a 20% error limit, 29 sample-trees per species and 81 trees for all species are required. For Husch, at 35% limit, 39 sample-trees per species and 158 trees for all species are required. The third objective aimed to compare the volumetric precision of the different forms of tree volume modeling (form factor 0.7, estimated form factor, linear regression and artificial neural networks), for different sizes of sample-trees in Novo Repartimento-PA. A total of 681 sample-trees belonging to 52 species were considered. Trees were randomly selected to compose different sample sizes (25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300) for each

modeling method. The precision of the models was analyzed by the $Sy.x\%$, the BIC and the Graybill F test. The models with the lowest values of the precision parameters were selected. The factorial ANOVA (7x8) was used to compare the estimated volume by the methods in the different sample-trees sizes. The best models in terms of accuracy and precision were Schumacher-Hall, adjusted from 75 sample-trees, Husch, from 150 sample-trees and the double entry RNAs, from 100 sample-trees. Therefore, in order to generate a robust volumetric equation, 150 sample-trees must be rigorously measured for the fitting of the Husch model using linear regression.

Keywords: Sampling. Cubing. Form factor. Modeling. Regression. Artificial neural networks.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização da área de estudo no PDS III e IV Virola-Jatobá, município de Anapu, Estado do Pará.....**28**
- Figura 2.** Método de Smalian para a cubagem rigorosa de cada árvore-amostra, Onde: S são as seções de 2 em 2m, D os diâmetros de cada extremidade das seções e Sn é a última seção ($\leq 2m$).....**29**
- Figura 3.** Volume aproveitável (VA), obtido pela subtração do volume de perda (VP), cubado pelo método de Smalian, sobre o volume real (VR)**29**
- Figura 4.** Exemplificação da prática de obtenção por volume geométrico (VG).....**30**
- Figura 5.** Médias e seus respectivos intervalos de confiança entre as práticas de obtenção dos volumes de árvores por espécies em cada classe de diâmetro (1, 2, 3). VR (volume real); VA (volume aproveitável); VG (volume geométrico). As espécies Sop (*Syzygiopsis oppositifolia*); Mex (*Manilkara elata*); Mpa (*Manilkara paraensis*); Ale (*Astronium lecointei*) e Cou (*Couratari spp.*). Letras diferentes denotam diferença estatística entre as práticas de cubagem por espécie, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.....**33**
- Figura 6.** Método de Smalian para a cubagem rigorosa de cada árvore-amostra, Onde: S são as seções de 2 em 2m, D os diâmetros de cada extremidade das seções e Sn é a última seção ($\leq 2m$)..... **48**
- Figura 7.** Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa%), para cada espécie e para o conjunto das espécies no ajuste do modelo volumétrico de dupla entrada.....**52**
- Figura 8.** Comparação entre o número de ajustes simulados que apresentaram a precisão requerida (cinza) e o número de ajustes simulados, que não apresentaram a precisão requerida (preto), após o ajuste do modelo de dupla entrada, no município de Novo Repartimento, Pará. Ente parênteses encontram-se o LEa% para cada espécie e para o conjunto das espécies.....**53**
- Figura 9.** Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível, para cada espécie e para o conjunto das espécies no ajuste do modelo volumétrico de simples entrada**54**
- Figura 10.** Comparação entre o número de ajustes simulados que apresentaram a precisão requerida (cinza) e o número de ajustes simulados, que não apresentaram a precisão requerida (preto), após o ajuste do modelo de simples entrada, no município de Novo Repartimento, Pará. Ente parênteses encontram-se o LEa% para cada espécie e para o conjunto das espécies**55**
- Figura 11.** Método de Smalian para a cubagem rigorosa de cada árvore-amostra, Onde: S são as seções de 2 em 2m, D os diâmetros de cada extremidade das seções e Sn é a

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Número de amostras por espécie e por classe diamétrica, estudadas no Projeto de Desenvolvimento Sustentável Virola-jatobá, município de Anapu, Pará. Classes diamétricas: classe 1: de 0,60 a 0,79 m; classe 2: de 0,80 a 0,99 m; e classe 3: de 1,00 a 1,20 m. Tratamentos: volume real (VR), volume aproveitável (VA) e volume geométrico (VG).....**31**
- Tabela 2.** Análise da variância em esquema fatorial (5 x 3 x 3) para as médias volumétricas em função dos fatores espécies, classes diamétricas e práticas de obtenção do volume, no município de Anapu, Pará. GL= Grau de liberdade; SQ= Soma dos quadrados; QM= Quadrados médios; F = Teste F e p = probabilidade do teste F.....**32**
- Tabela 3.** Análise da variância da influência dos fatores espécies, classes diamétricas e prática de obtenção do volume sobre o volume de árvores no município de Anapu, Pará. GL= Grau de liberdade; SQ= Soma dos quadrados; QM= Quadrados médios; F= Teste F e p= probabilidade do teste F.....**32**
- Tabela 4.** Percentual médio de perda em volume por espécie e por classe de diâmetro, estudados no Projeto de Desenvolvimento Sustentável Virola-jatobá, no município de Anapu, Pará.....**34**
- Tabela 5.** Número de árvores-amostra (N), por espécie, utilizadas para o ajuste do modelo volumétrico no município de Novo Repartimento, Pará. Valores médio (med.), mínimo (min.) e máximo (max.) do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura comercial (hc), ambos medidos em metros (m).....**47**
- Tabela 6.** Comparação entre o limite de erro admissível (LEa) e o índice de confiabilidade (IC%) obtido do ajuste do modelo volumétrico de dupla entrada para cada espécie e para o conjunto das espécies, no município de Novo Repartimento, Pará. n = número mínimo de árvores-amostra, LE = limite de erro, ns = número de simulações, s^2 IC% = variância do índice de confiabilidade, $s_{\bar{x}}$ IC% = erro padrão da média, t calc.= t calculado, t tab. = t tabelado e p = probabilidade do teste t.....**50**
- Tabela 7.** Comparação entre o limite de erro admissível (LEa) e o índice de confiabilidade (IC%) obtido do ajuste do modelo volumétrico de simples entrada para cada espécie e para o conjunto das espécies, no município de Novo Repartimento, Pará. n = número mínimo de árvores-amostra, LE = limite de erro, ns = número de simulações, s^2 IC = variância do índice de confiabilidade, $s_{\bar{x}}$ IC% = erro padrão da média, t calc.= t calculado, t tab. = t tabelado e p = probabilidade do teste t.....**51**
- Tabela 8.** Número árvores-amostra (N), por espécie, utilizadas para a modelagem volumétrica no município de Novo Repartimento, Pará. Valores médio (med.), mínimo (min.) e máximo (max.) do Diâmetro à altura do peito (DAP) e altura comercial (hc), ambos medidos em metros (m).....**81**

Tabela 9.	Número de árvores por classe diamétrica utilizadas para construir e validar os modelos de volumes analisados.	84
Tabela 10.	Erro padrão da estimativa ($S_{y.x}\%$), erro padrão da estimativa recalculado ($S_{y.xr}\%$), critério de informação Bayesiano (BIC) dos diferentes modelos volumétricos nos diferentes números de árvores-amostra (n), teste F de Graybill (F), classificação do modelo avaliado ($C1, C2, C3$). Em negrito, os modelos de destaque, no município de Novo Repartimento-Pará.	89

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.1 A tese	20
1.2 Referências Bibliográficas	21
2 COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PRÁTICAS DE OBTENÇÃO DO VOLUME DE ÁRVORES NO MUNICÍPIO DE ANAPU, PARÁ	25
Resumo	25
Abstract	26
2.1 Introdução	27
2.2 Material e Métodos	29
2.2.1 Caracterização da área de estudo	29
2.2.2 Coleta dos dados	30
2.2.3 Análise dos dados	32
2.3 Resultados	33
2.4 Discussão	37
2.5 Conclusão	40
2.6 Referências Bibliográficas	40
Apêndice 1	43
3 QUAL O TAMANHO MÍNIMO DE AMOSTRA PARA COMPOR UMA EQUAÇÃO DE VOLUME PARA ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA?	45
Resumo	45
Abstract	46
3.2 Material e Métodos	48
3.2.1 Caracterização Da Área De Estudo	48
3.2.2 Amostragem	49
3.2.3 Modelagem e Análises estatísticas	50
3.3 Resultados	52
3.4 Discussão	58
3.5 Conclusão	61
3.6 Referências Bibliográficas	62
Apêndice 2	65
Apêndice 3	72
4 ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA PARA ÁRVORES EM PÉ: QUAL O MELHOR MÉTODO?	79
Resumo	79
Abstract	80
4.1 Introdução	81
4.2 Material e Métodos	83
4.2.1 Caracterização da área de estudo	83
4.2.2 Amostragem e cubagem das toras	83
4.2.3 Modelagem volumétrica pelo fator de forma 0,7	86
4.2.4 Modelagem volumétrica pelo fator de forma médio	86
4.2.5 Modelagem volumétrica por regressão linear	87
4.2.6 Modelagem volumétrica por RNA's	87
4.3 Resultados	91
4.3.1 Precisão da estimativa dos modelos volumétricos ajustados	91

4.3.2 Exatidão dos modelos volumétricos ajustados	92
4.4 Discussão	95
4.5 Conclusão	98
4.6 Referências Bibliográficas	98
Apêndice 4	103
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é um país florestal, que possui aproximadamente 485 milhões de hectares de florestas nativas, sendo que aproximadamente 342 milhões de hectares pertencem a floresta Amazônica (SNIF, 2017), onde 52% da área são considerados efetivamente disponíveis para a iniciativa privada, o que torna a Amazônia atrativa aos olhos do empreendedorismo florestal (SNIF, 2016). No estado do Pará, o setor madeireiro levanta cerca de 400 milhões de dólares por ano em toras, sendo o maior produtor de madeira originada das florestas nativas brasileiras (SEFA, 2017).

Neste contexto, o volume de madeira passa a ser a informação mais valiosa para a elaboração e execução de um plano de manejo florestal sustentável, pois gera conhecimentos essenciais que propiciam tomadas de decisões mais coerentes, não somente sobre o uso, mas também sobre a promoção do desenvolvimento de uma floresta (MASOTA et al, 2014; RIBEIRO et al., 2014). Para obter maior precisão nas estimativas do volume devem ser empregados métodos de modelagem matemáticas desenvolvidas a partir da cubagem rigorosa de árvores-amostra recentemente abatidas ou em pé (CAMPOS; LEITE, 2009). Pode-se dizer que a modelagem volumétrica é o objetivo principal do inventário florestal para fins de produção de madeira na Amazônia Brasileira, pois uma estimativa precisa assegura um melhor controle da produção de madeira em um empreendimento florestal (BARRETO et al. 2014).

A cubagem rigorosa de árvores-amostra é o primeiro passo para o desenvolvimento de uma modelo volumétrico de qualidade. Esse procedimento pode ser realizado pelos métodos de Huber, Newton, Smalian, dentre outros; para os quais são necessárias medições de diâmetros em seções ao longo do tronco, diferenciando somente na posição e no número de medições de cada seção, sendo que pela fórmula de Huber é medido o centro da seção, enquanto a fórmula de Newton considera tanto as extremidades quanto o centro de cada seção e fórmula proposta por Smalian é medido as extremidades de cada seção (LOETSCH et al., 1973). A fórmula proposta por Smalian é a mais utilizada na cubagem de toras da Amazônia brasileira, devido a maior praticidade de execução em campo (LEÓN; VALÊNCIA, 2013).

A partir da matriz de dados estabelecida, contendo o volume real das amostras os modelos volumétricos podem ser elaborados por meio do ajuste de equações matemáticas por meio da técnica de regressão e emprego de redes neurais artificiais (BINOTI et al. 2014). Neste sentido, o modelo mais adequado com base nos critérios da qualidade do ajuste será

selecionado para estimar o volume individual das árvores em pé numa Unidade de Manejo Florestal Sustentável (UMF) (SANTOS et al., 2012).

Os modelos matemáticos utilizados para o ajuste de equações de volumétricas podem apresentar uma variável independente (simples entrada) ou duas variáveis independentes (dupla entrada), ou seja, para a obtenção do volume estimado (variável dependente) os modelos podem apresentar somente o diâmetro a altura do peito (DAP) ou DAP e altura total (h) das árvores (LOETSCH et al., 1973). Os modelos de simples entrada podem ser adotados se confirmada a existência de elevada correlação entre DAP e altura, caso o contrário o modelo de dupla entrada é o mais (ROLIM et al., 2006).

No Brasil, a equação do cilindro multiplicado pelo fator de forma 0,7 (HEINSDIJK, 1958) é utilizado desde muito tempo para estimar o volume de madeira em pé no interior de uma UMF, no entanto, a partir do ano de 2006 três instrumentos legais passaram a exigir o uso de equação local para estimar o volume de árvores em pé a partir do segundo Plano Operacional Anual (POA) de uma UMF. O primeiro é a Instrução Normativa nº 05 de 11/12/2006 (BRASIL, 2006) que trata sobre os procedimentos para elaboração de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) na Amazônia. O segundo é a Norma de Execução nº 1, de 24/05/2007 (BRASIL, 2007) que define diretrizes técnicas a serem seguidas pelos PMFS envolvendo questões sobre volumetria. Finalmente, a Resolução nº 406 de 02/02/2009 (BRASIL, 2009) estabelece os parâmetros de regulação da produção para PMFS e a obrigatoriedade da determinação do estoque volumétrico após o segundo ano de exploração, por meio de relações dendrométricas. Entretanto, esses instrumentos legais não impõem um método específico para o ajuste de equações volumétricas.

Ajustar equações específicas para cada local a ser manejado é muito importante devido alguns fatores, como as condições distintas do clima, solo e genética das espécies arbóreas que são determinantes nas relações dendrométricas das árvores para cada localidade (ROLIM et al., 2006; VALENTE et al., 2011). Desta forma muitos modelos volumétricos têm sido ajustados para florestas nativas em diversas áreas da Amazônia brasileira, como Fernandes et al. (1983) e Higuchi e Ramm (1985) ajustaram para florestas no município de Manaus (AM); Figueiredo Filho et al. (1982) ajustaram para as florestas nos municípios de Tefé e Juruá (AM); Thaines et al. (2010) em Lábrea (AM); Silva e Carvalho (1984) para o município de Belterra (PA); Silva e Araújo (1984) e Silva (1984) para as florestas do Tapajós (PA); Rolim et al. (2006) para a Serra dos Carajás (PA); Barros e Silva Júnior (2009); Barreto et al. (2014) para Anapu (PA); Silva e Santana (2014) para Paragominas (PA); Colpini et al. (2009) para a região noroeste (MT); Gimenez et al. (2015) para Rorainópolis (RR); Tonini e Borges (2015)

para Caracarái (RR); Silva et al. (2018) para a Flona de Tapajós, Belterra (PA) e Lansanova et al. (2018) em Santa Carmem (MT).

Habitualmente os ajustes dos modelos volumétricos advém da aplicação de regressão linear, como os trabalhos citados acima. No entanto, uma abordagem nova na modelagem volumétrica vem ganhando espaço no meio das ciências florestais. As Redes Neurais Artificiais (RNA's) são técnicas computacionais fundamentadas na inteligência artificial dos seres humanos, adquirindo conhecimento por meio de treinamentos (AKKOÇ, 2012).

Esses neurônios artificiais são modelos matemáticos simplificados dos próprios neurônios biológicos, recebendo as informações de entrada, ponderando pesos sinápticos e gerando respostas únicas como resultado (BRAGA et al., 2007; BINOTI et al. 2014). Estruturalmente uma RNA está ligada ao algoritmo de aprendizagem usado para treinar a rede, sendo composto por camadas de neurônios paralelos e conectados entre si, podendo ser formado por uma camada de entrada (entrada das variáveis independentes), uma ou mais camadas intermediárias (extração das características) e uma camada de saída, como resultado da RNA (variável dependente) (HAYKIN, 2001).

Alguns estudos mostram uma leve eficiência da modelagem volumétrica advinda das RNA's em termos de precisão e acuracidade, quando comparada com a modelagem volumétrica desenvolvida por meio da análise da regressão linear, principalmente em áreas de monocultivos florestais (BINOTI et al. 2013; CORDEIRO et al. 2015; LEAL et al. 2015b; VENDRUSCOLO et al. 2015). Este sucesso é devido as estruturas robustas das RNA's, que apresentam uma maior tolerância a ocorrência de outliers, além de possuir a capacidade de modelar não somente variáveis quantitativas, mas também variáveis qualitativas (BINOTI, 2013; LACERDA et al. 2017) e podem tolerar um número reduzido de unidades de árvores-amostra na sua camada de entrada (DIAMANTOPOULOU; MILIOS, 2010).

Independente dos métodos de modelagem volumétrica sendo ele por regressão linear ou pelo emprego de RNA's, alguns fatores como o método de determinação volumétrica, espécies ou agrupamento de espécies, classes de diâmetro e número de árvores-amostra, são importantíssimos e podem interferir na qualidade do ajuste de um modelo volumétrico (RIBEIRO et al., 2014; DIAS, 2016). E se tratando de árvores de valor comercial, um modelo volumétrico confiável garante uma avaliação mais precisa do estoque de madeira e do potencial para exploração futura (MASOTA et al., 2014; RIBEIRO et al., 2014), isso interfere positivamente no planejamento da exploração florestal, podendo elevar os lucros das empresas e minimizar a possibilidade do comércio ilegal de créditos de volume de madeira (RIBEIRO et al., 2014).

Outro fator como a diversidade de espécies arbóreas nas florestas tropicais é um problema para o ajuste de modelos volumétricos, uma vez que as formas geométricas das espécies são diferentes, ocasionando um aumento da variância dos dados de volume real e conseqüentemente prejudicando a precisão do modelo volumétrico ajustado (DIAS, 2016). Segundo Akindele (2005), existem três possibilidades para o desenvolvimento de equações volumétricas para espécies de florestas tropicais: (1) gerar equações volumétricas individuais para cada espécie; (2) gerar equações volumétricas para todas as espécies inventariadas; ou ainda, (3) ajustar equações volumétricas por grau de semelhança entre as espécies. Obviamente que a situação ideal seria a primeira, mas isso seria inviável, para uma determinada área de efetivo manejo florestal, uma vez que a maioria das espécies possuem poucos indivíduos por unidade de área, não havendo dados suficientes para garantir um bom ajuste dos modelos volumétricos, além dos custos que seriam muito elevados (AKINDELE; LEMAY, 2006).

Um fator determinante que pode influenciar na qualidade do ajuste de modelos volumétricos é o número de árvores-amostra a serem cubadas. Segundo Barreto et al, (2004), quanto maior o número de árvores-amostra, menor é a variabilidade dos dados e conseqüentemente melhor será a qualidade do ajuste. No entanto, cubar muitas árvores pode ser uma prática inviável no ajuste de modelos volumétricos em uma UMF (GUIMARÃES; LEITE, 1996; OLIVEIRA et al., 2009).

Pouca atenção tem sido dada ao mínimo de árvores-amostra cubadas para a geração de equações volumétricas. A falta de estudos para espécies folhosas neste sentido tem conduzido na região amazônica à utilização de um número de árvores-amostra cubadas que variam entre 30 e 2500 amostras (HIGUCHI; RAMM, 1985; ROLIM et al., 2006; BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009; THAINES et al., 2010; BARRETO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2014; GIMENEZ et al., 2015). Muitas árvores-amostra demandaria muito tempo e conseqüentemente elevaria os custos desta operação; mas por outro lado, um número reduzido de árvores-amostra poderia resultar em um modelo volumétrico menos preciso (LEAL et al., 2015a).

Para ajustar um bom modelo volumétrico Guimarães e Leite (1996) e Semas (2010) aconselham a cubagem de 100 a 150 árvores amostras, dependendo do número de espécies e variação volumétrica de uma determinada área. Neste sentido a aplicação das RNA's pode ser viável, pois as mesmas podem tolerar um número reduzido de árvores-amostra sem afetar a precisão do modelo volumétrico (DIAMANTOPOULOU; MILIOS, 2010).

1. 1 A tese

Buscar a melhor forma de representação do volume real, determinar o número mínimo de árvores amostra que garanta um bom ajuste de uma equação volumétrica e analisar diferentes métodos de estimativa volumétrica é muito importante para o administrador florestal manejar a região amazônica, uma vez que pode gerar informações mais confiáveis acerca do estoque florestal e pode dar suporte para conservação das florestas manejadas. Neste contexto esta tese objetiva buscar estratégias que possam melhorar a qualidade do ajuste de modelos matemáticos para estimar o volume de árvores em pé no sudeste do Pará.

A qualidade do ajuste de modelos estatísticos para estimar o volume de árvores em pé foram estudados a partir de três perspectivas, as quais serão apresentadas nos três próximos capítulos, que corresponde ao corpo principal da tese. Na primeira análise foram levantados três objetivos: o primeiro foi comparar as três práticas de medição dos volumes de árvores (volume real, volume aproveitável e volume geométrico); o segundo foi verificar a influência das espécies e das classes diamétricas na composição do volume de madeira obtido pelas três práticas de medição do volume; e por último foi quantificar as perdas volumétricas após o corte das árvores em uma unidade de manejo florestal comunitário, localizada no município de Anapu no estado do Pará, Brasil (Capítulo 2). Uma hipótese foi testada:

H1: o volume real, determinado pelo método de cubagem rigorosa por Smalian, é estatisticamente similar ao volume geométrico e ao volume aproveitável.

A segunda análise buscou determinar o número mínimo de árvores a serem cubadas para seis espécies de valor comercial em uma unidade de manejo florestal empresarial, localizada no município de Novo Repartimento no estado do Pará, Brasil (Capítulo 3). Duas hipóteses foram testadas:

H2: independente da equação a ser utilizada o mínimo de 30 árvores-amostra garantem ajustes de modelos volumétricos viáveis por espécie;

H3: independente da equação a ser utilizada até 100 árvores-amostra, garantem um ajuste aceitável para estimativa do volume de árvores para todo o conjunto das espécies.

A terceira análise buscou comparar a precisão volumétrica das diferentes formas de modelagem do volume individual de árvores (fator de forma 0,7, fator de forma médio, dois modelos de regressão linear e duas redes neurais artificiais), identificando aquela que apresenta maior precisão volumétrica tendo em vista os diferentes tamanhos de árvores-amostra. Uma hipótese foi testada:

H4: os diferentes métodos de modelagem do volume individual de árvores produzem a mesma precisão da estimativa, independentemente do tamanho da amostra utilizados para o ajuste dos modelos.

1.2 Referências Bibliográficas

AKKOÇ, S. An empirical comparison of conventional techniques, neural networks and the three-stage hybrid Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) model for credit scoring analysis: The case of Turkish credit card data. **European Journal of Operational Research**, v. 222, n. 1, p. 168-178, 2012.

AKINDELE, S.O. **Volume functions for timber species of Nigeria's tropical rainforests.** ITTO. 2005.

AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, v. 226, n. 1, p. 41-48, 2006.

BARRETO, W. F.; LEÃO, F. M.; MENEZES, M. C.; SOUZA, D. V. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 321-329, 2014.

BARROS, P.L.C.; SILVA JUNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapu, oeste do estado do Pará, Amazônia oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 51, n. 1, p. 115-126, 2009.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 639 – 645, 2013.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 5, n. 1, 10-12953, 2014.

BRAGA, A. P; CARVALHO, A. P. L. F; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações.** 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

BRASIL. Instrução Normativa n.º 5 de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, treze de dezembro de 2006.

BRASIL. Norma de Execução n.º 1, de 24 de abril de 2007. Institui, no âmbito desta Autarquia, as Diretrizes Técnicas para Elaboração dos Planos de Manejo Florestal Sustentável – PMFS de que trata o art. 19 da Lei 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, trinta de abril de 2007.

BRASIL. Resolução Conama n.º 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano

de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, seis de fevereiro de 2009.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 470p.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D. P.; SOARES, T. S.; SILVA, V. S. M. 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**, v. 39, n.1, p.97-104, 2009.

CORDEIRO, M. A; PEREIRA, N. N. DE J.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. DA S.; LEITE, H. G. Estimativa do volume de *Acacia mangium* utilizando técnicas de redes neurais artificiais e máquinas vetor de suporte. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 255261, 2015.

DIAMANTOPOULOU, M. J.; MILIOS, E. Modelling total volume of dominant pine trees in reforestations via multivariate analysis and artificial neural network models. **Biosystems engineering**, v. 105, n. 3, p. 306-315, 2010.

DIAS, L. P. **Desenvolvimento de equações de volume em florestas tropicais: ensaio de metodologia de agrupamento de dados para as espécies de Timor-Leste**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Timor-Leste, 2016.

FERNANDES, N. P.; JARDIM, F. C. S.; HIGUCHI, N. Tabelas de volume para a floresta de terra firme da Estação Experimental de Silvicultura Tropical. **Acta Amazonica**, v.13, n. 3-4, p. 537-545, 1983.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; ROSOT, N. C. Estimativas volumétricas por Unidade de Área em Florestas Naturais. **Silvicultura Em São Paulo**, v. 16, p. 491-504, 1982.

GIMENEZ, B. O.; DANIELLI, F. E.; OLIVEIRA, C. K. A.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 291-301, 2015.

GUIMARÃES, D.P.; LEITE, H. G. Árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. 37-42, 1996.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 898 p.

HEINSDIJK, D. **Report to the government of Brazil on a forest inventory in the Amazon Valley (region between rio Xingu and rio Tocantins)**. Roma: FAO, 1958, 93p.

HIGUCHI, N.; RAMM, W. Developing bole wood volume equations for a group of tree species of central Amazon (Brazil). **The Commonwealth Forestry Review**, p. 33-41, 1985.

LACERDA, T. H. S.; CABACINHA, C. D.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MAIA, R. D.; LACERDA, K. W. D. S. Artificial neural networks for estimating tree volume in the brazilian savanna. **Cerne**, v. 23, n. 4, 483-491, 2017.

- LANSSANOVA, L. R.; SILVA, F. A.; SCHONS, C. T.; PERERIRA, A. C. D. S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 1, n. 1, p. 109-115, 2018.
- LEAL, F. A.; CABACINHA, C. D.; CASTRO, R. V. O.; & MATRICARDI, E. A. T. Amostragem de árvores de Eucalyptus na cubagem rigorosa para estimativa de modelos volumétricos. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, p. 91-103, 2015a.
- LEAL, F. A.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, 233-249, 2015b.
- LEÓN, G. C.; VALENCIA, L. P. V. Theoretical evaluation of Huber and Smalian methods applied to tree stem classical geometries. **Bosque**, v. 34, n. 3, 2013.
- LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. Munich: BLV, 1973. 469 p.
- MASOTA, A. M.; ZAHABU, E.; MALIMBWI, R. E.; BOLLANDSÅS, O. M.; Eid, T. H. Volume models for single trees in tropical rainforests in Tanzania. **Journal of Energy and Natural Resources**. v. 3, n. 5, p. 66-76, 2014.
- OLIVEIRA, M. L. R.; LEITE, H. G.; GARCIA, S. L. R.; CHAGAS, J. C.; CAMPOS, C. P. B. S.; SANTANA, R. C. Estimação do volume de árvores de clones de eucalipto pelo método da similaridade de perfis. **Revista Árvore**. v. 33, p. 133-141, 2009.
- RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; MELO, L. O. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 305 – 612, 2014.
- ROLIM, S. G.; COUTO, H. D.; JESUS, R. D.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). **Acta Amazonica**, v. 36, n. 1, p. 107-114, 2006.
- SANTOS, A. T.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; ROSOT, N. C. Equação de volume e relação hipsométrica para plantio de *Ocotea porosa*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 69, p. 13 - 21, 2012.
- SEFA-PA. **Boletim de preços mínimos de mercado – Madeira**. SEFA, 2017. Belém. Disponível em: <http://sefa.pa.gov.br/legislacao/interna/portaria/ps2005_00354an0.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.
- SEMAS. **Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável**. SEMAS, 2010. Belém. Disponível em: <<http://www.acszanzini.net/wpcontent/uploads/material/apostilas/APOSTILA%20INVENT%20C3%81RIO.pdf>>. Acesso em: 18 Dec. 2016.
- SILVA, R. C.; RIBEIRO, R. B. D. S.; & Ximenes, L. C. Ajuste de equações volumétricas para diferentes seccionamentos de tora em uma floresta sob manejo florestal comunitário. **Acta Tecnológica**, v. 12, n. 2, 85-102, 2018
- SILVA, E. M.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 631, 2014.

SILVA, J. N. M. Equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8/9, p. 50-63, 1984.

SILVA, J. N. M.; ARAÚJO, S. M. Equação de volume para árvores de pequeno diâmetro, na Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8/9, p. 16- 25, 1984.

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, M. S. P. Equações de volume para uma floresta secundária no Planalto do Tapajós-Belterra, Pa. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 8/9, p. 1-15, 1984.

SNIF. **Recursos florestais**. SNIF, 2016. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/2231-boletim-snif-recursos-florestais-2016>> Acesso em: 18 Dec. 2018.

SNIF. **Boletim SNIF 2017**. SNIF, 2017. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/3230-boletim-snif-2017-ed1-final/file>> Acesso em: 18 Dec. 2018.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P.; THAINES, A. A. R. Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 283, 2010.

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 111-117, 2015.

VALENTE, M. D. R.; QUEIROZ, W. T.; PINHEIRO, J. G.; MONTEIRO, L. A. D. S. Modelo de predição para o volume total de Quaruba (*Vochysia inundata* ducke) via análise de fatores e regressão. **Revista árvore**, v. 35, n. 2, 2011.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R.; SOUZA, H. S.; Moura, J. P. V. M., MAMORÉ, F. M. D., & SIQUEIRA, T. D. S. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v.33, n 4, 556-569, 2015.

2 COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PRÁTICAS DE OBTENÇÃO DO VOLUME DE ÁRVORES NO MUNICÍPIO DE ANAPU, PARÁ¹

Resumo

O objetivo deste trabalho foi comparar três práticas de medição do volume de árvores individuais utilizadas amplamente como base para ajuste de funções volumétricas em áreas sob manejo florestal na Amazônia Brasileira, bem como verificar a influência das características das espécies e das classes diamétricas na obtenção do volume individual das árvores. Foram analisadas 53 árvores-amostra pertencentes a cinco espécies, separadas em três classes diamétricas. Essas árvores foram cubadas pelo método de Smalian de duas maneiras: com seções fixas de 2 metros (VR) e seções de tamanhos variados ao longo do fuste de acordo com o traçamento do fuste (VG). Para a obtenção do volume aproveitável (VA) o volume da perda (VP), cubado pelo método de Smalian após sua retirada foi subtraído do VR. Foi realizada uma ANOVA em esquema fatorial (5 x 3 x 3) para verificar o efeito das 5 espécies, das 3 classes diamétricas e 3 práticas de medição de volume (VR, VG e VA) sobre os diferentes volumes obtidos. Houve efeito significativo dos três fatores sob análise, entretanto não houve interações entre esses fatores. Os volumes obtidos por cubagem de seções de tamanhos desiguais (VG), apresentaram em média volume menor que VR. Apesar de não haver diferença entre as médias de VA e VR, a perda de madeira foi de 6,5% do volume total. Há uma relação entre tamanho e volume perdido, conforme a presença de ocos, tortuosidades e rachaduras das toras nas maiores classes diamétricas.

Palavras-Chave: Cubagem, Classes de diâmetro, Perdas, Manejo florestal comunitário.

¹ Este artigo segue as normas do periódico Floresta

COMPARISON BETWEEN DIFFERENT FIELD PRACTICES TO OBTAIN TREE VOLUME IN THE MUNICIPALITY OF ANAPU, PARÁ.

Abstract

The objective of this work was to compare three practices for measuring the individual tree volume widely used as a basis for fitting volumetric functions in areas under forest management in the Brazilian Amazon. Additionally, verify the influence of the species characteristics and of the diametric classes in obtaining of the individual trees volume. Fifty-three sampled trees of five species were analyzed and separated into three diametric classes. These trees were measured using the Smalian method in two different procedures: with fixed sections of 2 meters of length (VR) and sections of unequal lengths along the stem (VG). To obtain the usable volume (VA), the volume lost due to the presence of hollows, tortuosity's and cracks in the logs (VP) was subtracted from the VR. A factorial ANOVA (5 x 3 x 3) was performed to verify the effect of the five species, three diametric classes and three methods of volume measurement (VR, VG and VA) on tree volume. All three factors showed influence on tree volume, however there were no interactions between factors. The volumes found by measuring sections of unequal lengths (VG) presented in average a smaller volume than VR. Although there was no difference between the means of VA and VR, the loss in tree volume represented 6.5% of the total volume. There is a relation between the size of the trees and the loss of volume, since the largest losses were found in the upper diametric classes.

Keywords: Mensuration, Diametric classes, Volume loss, Community forest management.

2.1 Introdução

O volume de madeira é um importante atributo dendrométrico para a análise de viabilidade do manejo florestal sustentável na Amazônia, uma vez que fornece informações quantitativas da floresta que propiciam a tomada de decisões mais acertadas quanto ao uso do estoque florestal de uma determinada área (BARRETO et al., 2014). O volume depende de alguns fatores indiretos, tais como o método de medição e o ajuste de equações que estimam o volume, além de fatores diretos, como a espécie, tamanhos e forma do fuste, e a sanidade das árvores a serem avaliadas.

Três instrumentos legais exigem o uso de uma equação local para estimar o volume de árvores em pé a partir do segundo Plano Operacional Anual (POA) de uma unidade de manejo florestal sustentável. O primeiro é a Instrução Normativa nº 05 de 11/12/2006 (BRASIL, 2006a) que trata sobre os procedimentos para elaboração de planos de manejo florestal sustentável (PMFS) na Amazônia. O segundo é a Norma de Execução nº 1, de 24/05/2007 (BRASIL, 2007b) que define diretrizes técnicas a serem seguidas pelos PMFS envolvendo questões sobre volumetria. Finalmente, a Resolução nº 406 de 02/02/2009 (BRASIL, 2009) estabelece os parâmetros de regulação da produção para PMFS e a obrigatoriedade da determinação do estoque volumétrico após o segundo ano de exploração por meio de relações dendrométricas. Entretanto, esses instrumentos legais não impõem um método específico para o ajuste de equações volumétricas.

Na Amazônia Brasileira, as quantificações volumétricas são realizadas a partir de modelos de regressão linear, nos quais a variável dependente é o volume real (VR), obtido por meio de cubagem rigorosa das árvores recém derrubadas, e as variáveis independentes são o diâmetro a 1,30m do solo (Dap) e altura do fuste (H), ambas obtidas em campo no momento do inventário florestal 100% (LANSSANOVA et al., 2018). A cubagem rigorosa é o método comumente utilizado para quantificar o VR das árvores, consistindo na integração do volume existente entre secções pré-definidas ao longo do fuste (NICOLETTI et al., 2015). No estado do Pará é sugerido o uso de secções de 2 em 2 metros ao longo do fuste das árvores (FRANCEZ, et al., 2017). Essa prática é, contudo, demorada e onerosa, pois pode requerer até cinco pessoas para realizar as medições com o devido detalhamento e, dependendo do porte de cada árvore medida, o tempo consumido pode ultrapassar 20 minutos (BUZA et al., 2006).

Uma alternativa de menor custo seria utilizar o volume geométrico (VG) para o ajuste das equações volumétricas, sendo amplamente realizada por demandar apenas duas pessoas, tomando entre cinco a dez minutos por árvore (RIBEIRO et al., 2014; GOMES et al.,

2018). Tal prática é, entretanto, considerada menos precisa para a determinação do VR (BUZA et al., 2006). As medições para determinar o VG são preconizadas pela Instrução Normativa nº 21, de 24/12/2014 (BRASIL, 2014), que dispõe sobre o funcionamento e utilização do Documento de Origem Florestal (DOF), e pela Instrução Normativa nº 10 de 8/5/2015 (BRASIL, 2015). Essas normativas definem as regras para organização física de produtos florestais madeireiros. As medições são realizadas no pátio de estocagem e devem ocorrer em todas as partes do fuste seccionado e após a retirada das perdas volumétricas, como rachaduras, imperfeições, presença de oco, ataque de pragas ou doenças. As perdas volumétricas podem ser atribuídas às características da floresta (multiânea e diversa), especialmente em relação ao estado fitossanitário, ao tamanho das árvores e aos atributos físicos e mecânicos da madeira de cada espécie, e às restrições de processamento (desdobro primário e secundário) em função das especificações dos diversos produtos madeireiros comercializados (tábuas, vigas, pranchões, postes etc.).

Considerar o VG similar ao VR para minimizar os custos, seria ignorar as diferenças existentes pelas perdas, uma vez que o volume final aproveitável seria o VR menos o volume de perdas (VP). Além das práticas de medição do volume, vale ressaltar que outros fatores podem interferir na determinação volumétrica, tais como: as espécies ou agrupamento das espécies e as dimensões das árvores, como DAP e altura. A diversidade de espécies arbóreas nas florestas tropicais é um problema para o ajuste de modelos volumétricos, uma vez que as formas das espécies são diferentes, ocasionando um aumento da variância dos dados de volume real e, conseqüentemente, prejudicando a precisão do modelo volumétrico ajustado (AKINDELE; LEMAY, 2006). Com relação à dimensão das árvores, quanto maior for o diâmetro, maior será o volume, uma vez que essa relação entre as duas variáveis é forte, no entanto, agrupar em classes diamétrica é uma boa estratégia para o ajuste de equações volumétricas (SILVA; SANTANA, 2014).

Diante do exposto, este trabalho objetivou: (i) comparar as três práticas de medição dos volumes (VR, VA e VG); (ii) verificar a influência das espécies e das classes diamétricas na composição do volume de madeira obtido pelas três práticas e (ii) quantificar as perdas volumétricas após o corte das árvores. A hipótese testada foi que o volume real, determinado pelo método de cubagem rigorosa de Smalian, é estatisticamente similar ao volume geométrico e ao volume aproveitável. Se esses volumes forem similares, o método geométrico pode ser empregado para determinar o volume real a partir do ajuste de equações volumétricas para o segundo Plano de Operação Anual, dispensando o método de cubagem rigorosa por Smalian, que demanda mais tempo e custo.

22.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo pertence ao Projeto de Desenvolvimento Sustentável III e IV (PDS) Virola-Jatobá (03° 10' 06,4'' S e 51° 17' 55,5'' W), Gleba Belo Monte com área de 41.640 ha, vicinal norte do km 120 da Rodovia Transamazônica, Município de Anapu, estado do Pará (Figura 1). A vegetação caracteriza-se por Floresta Ombrófila Densa. O relevo é caracterizado por planícies e serras acentuadas, sendo na sua maioria ondulado a fortemente ondulado. Os solos predominantes são Latossolos vermelho e amarelo. O clima é quente e úmido, do tipo Am segundo a classificação de Köppen, com precipitações anuais entre 1.500 mm a 2.500 mm e temperatura média maior que 27 °C e menor que 29,2 °C (ALVARES et al., 2013).

O PDS Virola – Jatobá foi criado no ano de 2002, com o intuito de explorar os recursos naturais de forma racional e acabar com o desmatamento ilegal no interior de suas terras. No ano de 2006, foi implantado o plano de manejo florestal sustentável (PMFS) de categorias comunitárias e plenas para produção de madeira em uma área de 23.467,73 ha. O objetivo do PMFS foi gerar desenvolvimento socioambiental e econômico, pautado na gestão participativa, na diversificação das atividades econômicas e na capacitação dos beneficiários, compatibilizada com a rotina produtiva e atividades existentes, possibilitando a construção coletiva e a promoção de projetos de longo prazo (BARRETO et al., 2014). As unidades de produção anual (UPA) variam de 500 a 1.000 ha, para um ciclo de corte de 30 anos, com 30 UPA's.

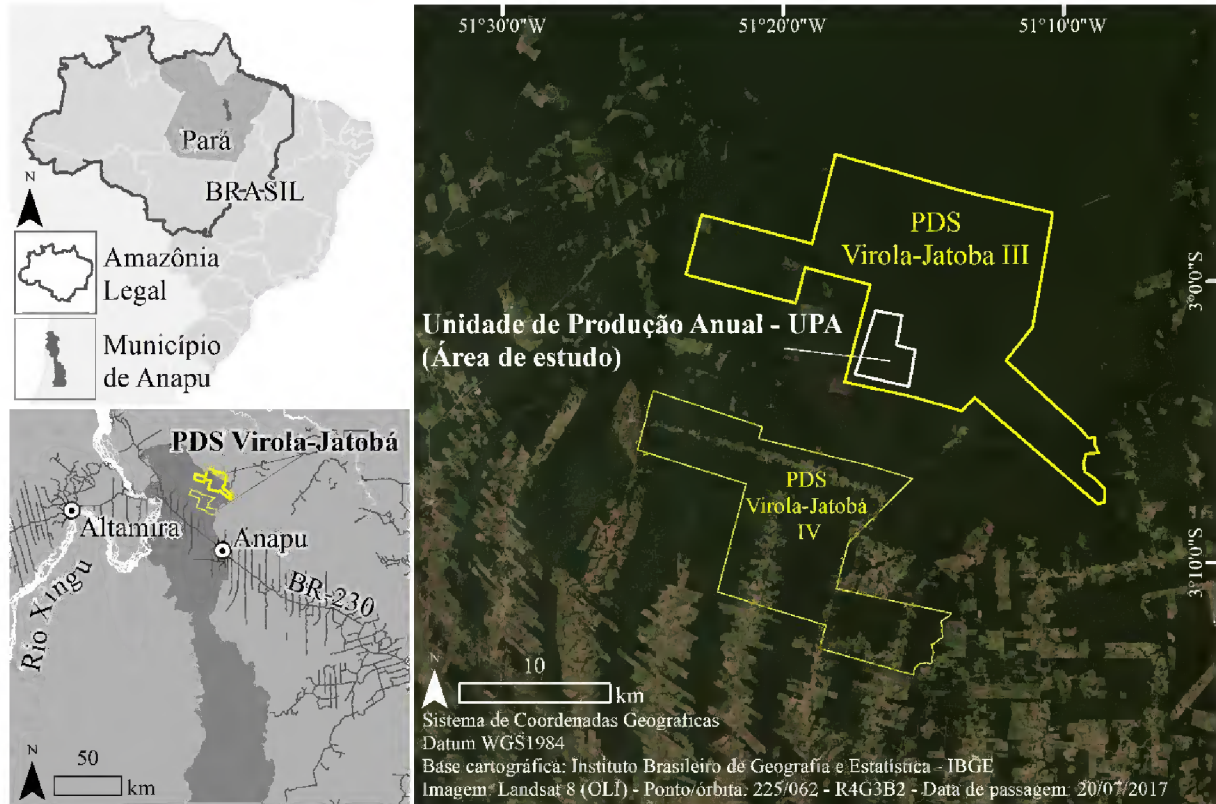


Figura 1. Localização da área de estudo no PDS III e IV Virola-Jatobá, município de Anapu, estado do Pará.

Figure 1. Study area location in PDS III and IV Virola-Jatobá, municipality of Anapu, state of Pará, Brazil.

2.2.2 Coleta dos dados

No ano de 2009, foram exploradas 1973 árvores de 23 espécies comerciais, correspondendo a $21,95 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Após a exploração, as espécies que continham indivíduos em várias classes de diâmetro foram separadas para este estudo. No total foram consideradas 53 árvores-amostra, pertencentes a cinco espécies comerciais, com diâmetro variando de 0,60 a 1,20 m. Para obtenção do volume real (VR), com um auxílio de uma trena métrica, cada árvore foi cubada pelo método de Smalian, com medições diamétricas sucessivas de 2 em 2 m ao longo do fuste até a última secção que podia ser menor ou igual a 2 m de comprimento (Figura 2). A formulação é dada por:

$$VR = \sum_{i=1}^n [(g_i + g_{i+1}) / 2] \cdot l$$

onde: VR o volume real (m^3), g_{i+1} a área transversal da extremidade menor (m^2), g_i a área transversal da extremidade maior (m^2), l o comprimento da secção (m), n o número de

secções.

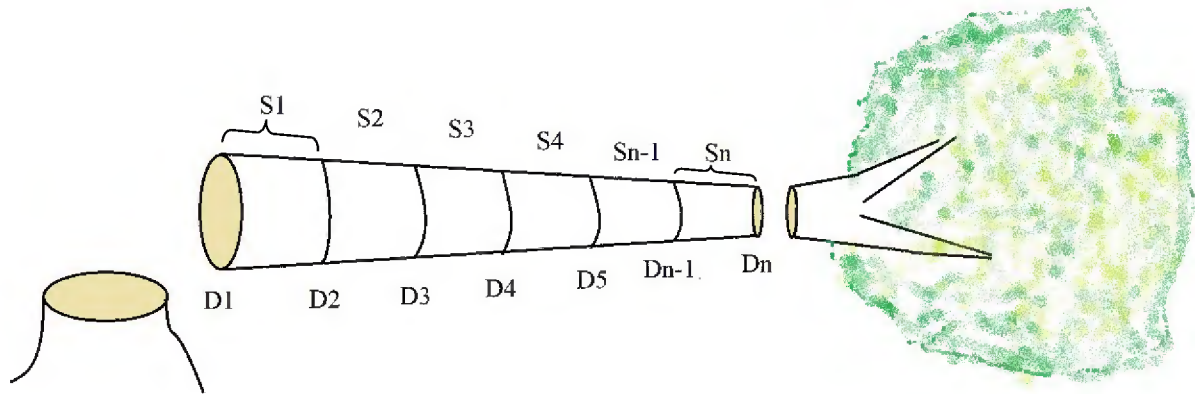


Figura 2: Método de Smalian para a cubagem rigorosa de cada árvore-amostra, Onde: S são as seções de 2 em 2m, D os diâmetros de cada extremidade das seções e Sn é a última seção ($\leq 2m$). Fonte: Autor.

Também foram calculados, pelo método de Smalian, o volume da perda das mesmas 53 árvores logo após o traçamento e retirada das partes das toras prejudicadas, que não podiam ser aproveitadas pelas serrarias, por apresentarem rachaduras, oco e imperfeições (Figura 3). Para a obtenção do volume aproveitável (VA), o volume da perda foi subtraído do VR.

$$VA = VR - VP$$

em que: VA é o volume aproveitável (m^3), VR o volume real, VP o volume de perda.

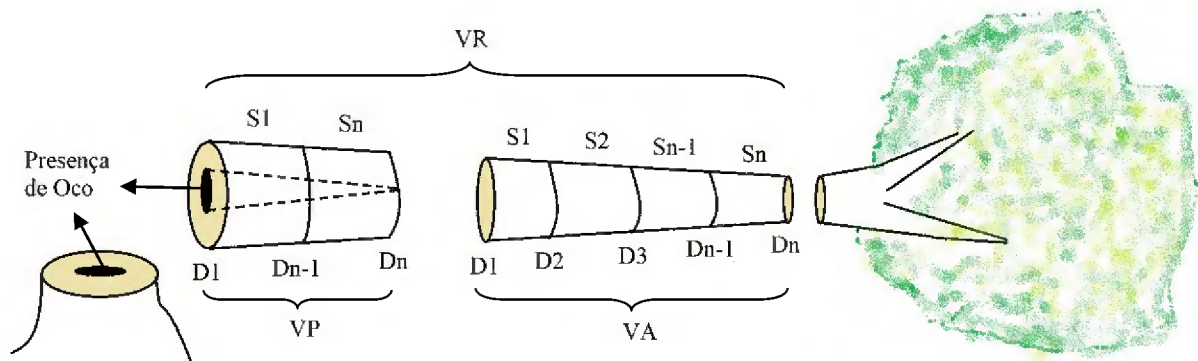


Figura 3: exemplificação do volume aproveitável (VA), obtido pela subtração do volume de perda (VP), cubado pelo método de Smalian, sobre o volume real (VR). Fonte: autor

As mesmas árvores, com o auxílio de uma trena métrica, também foram medidas no pátio de estocagem para obtenção do volume geométrico (VG), que foi calculado pela somatória dos volumes de cada uma das suas toras traçadas. Para obtenção do VG, o tamanho

da secção é o próprio comprimento da tora, que possuem tamanhos variados em função do processo de traçamento das mesmas (Figura 4), cuja fórmula é a mesma de VR, ou seja:

$$VG = \sum_{i=1}^n [(g_i + g_{i+1}) / 2] \cdot l$$

em que: VG o volume geométrico (m³), g_{i+1} a área transversal da extremidade menor (m²), g_i a área transversal da extremidade maior (m²), l o comprimento da tora (m), n o número de toras.

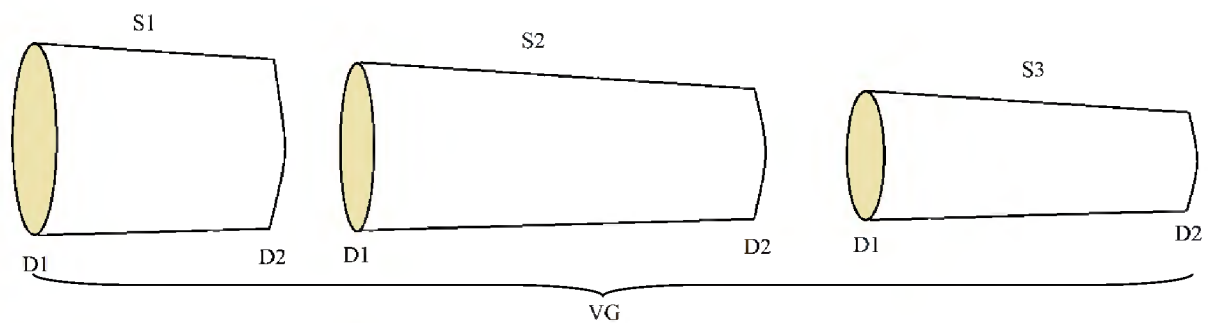


Figura 4: Exemplificação da prática de obtenção por volume geométrico (VG). Fonte: autor

2.2.3 Análise dos dados

Cinco espécies, separadas em três classes diamétricas, foram analisadas como fatores que influenciam a obtenção do volume pelas três práticas, formando um delineamento ao acaso em esquema fatorial de (5 x 3 x 3). Vale ressaltar que, as três classes diamétricas (classe 1: de 0,60 a 0,79 m; classe 2: de 0,80 a 0,99 m; e classe 3: de 1,00 a 1,20 m) foram utilizadas para que fosse garantido pelo menos duas repetições em cada classe (Tabela 1).

Os dados de 53 árvores foram transformados pelo método de Box-Cox para a condução da Análise de Variância (ANOVA), utilizando as médias volumétricas produzidas pelas diferentes práticas de obtenção de volume, classes diamétricas e espécies. Essa ação foi necessária para identificar o valor lambda (λ) que maximiza o estimador de máxima verossimilhança e minimiza o resíduo do modelo fatorial a ser empregado na ANOVA. Essa transformação da variável resposta (volume) visa as pressuposições de homocedasticidade e normalidade dos resíduos (AZEVEDO et al., 2015) (Apêndice 1).

As médias foram comparadas através do teste de comparação múltipla de Tukey, quando houve diferença significativa. Todas as análises foram consideradas ao nível de 95% de probabilidade e realizadas no Programa R 3.4.4 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, AT).

Tabela 1. Número de amostras por espécie e por classe diamétrica, estudadas no Projeto de Desenvolvimento Sustentável Virola-jatobá, município de Anapu, Pará. Classes diamétricas: classe 1: de 0,60 a 0,79 m; classe 2: de 0,80 a 0,99 m; e classe 3: de 1,00 a 1,20 m. Tratamentos: volume real (VR), volume aproveitável (VA) e volume geométrico (VG).

Table 1. Samples sizes per species and by diametric class studied in the Virola-jatobá Sustainable Development Project, municipality of Anapu, Pará. Diametric classes: class 1: from 0.60 to 0.79 m; class 2: from 0.80 to 0.99 m; and class 3: from 1.00 to 1.20 m. Treatments: real volume (VR), usable volume (VA) and geometric volume (VG).

Espécies	Classes diamétricas (m)	Número de amostras em cada Tratamento	Média VR (m ³)	Média VA (m ³)	Média VG (m ³)
<i>Syzygiopsis oppositifolia</i> Ducke (n= 7)	0,60 a 0,79	2	5,83	5,43	5,06
	0,80 a 0,99	3	10,76	10,08	9,45
	1,00 a 1,20	2	16,75	15,75	14,83
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach (n= 20)	0,60 a 0,79	8	5,88	5,47	5,10
	0,80 a 0,99	4	8,43	7,88	7,37
	1,00 a 1,20	8	14,04	13,18	12,39
<i>Manilkara paraensis</i> (A. DC.) A. Chev. (n= 7)	0,60 a 0,79	2	5,61	5,22	4,86
	0,80 a 0,99	3	9,45	8,84	8,28
	1,00 a 1,20	2	13,12	12,31	11,57
<i>Astronium lecointei</i> Ducke (n= 8)	0,60 a 0,79	3	6,89	6,42	6,00
	0,80 a 0,99	2	11,43	10,71	10,05
	1,00 a 1,20	3	18,02	16,96	15,98
<i>Couratari</i> spp. (n= 11)	0,60 a 0,79	4	6,72	6,26	5,85
	0,80 a 0,99	4	9,73	9,10	8,53
	1,00 a 1,20	3	15,84	14,01	14,89
Total		53			

2.3 Resultados

Após normalizar os dados ($\lambda = 0,142$), a análise fatorial indicou diferenças entre as práticas de obtenção de volume, entre as espécies e entre as classes diamétricas, mas não apresentou interações significativas entre esses fatores (Tabela 2). Sendo assim, os dados foram reanalisados sem o efeito das interações entre os fatores e considerando as práticas de obtenção do volume como blocos. Como resultado logo após a transformação dos dados ($\lambda = 0,141$), o valor da probabilidade foi potencializado, sendo menor do que na análise anterior (Tabela 3).

O VR (média seguida do desvio padrão = $10,6 \pm 4,79$ m³) apresentou maior volume do que o VG ($9,27 \pm 4,20$ m³). Ambos VR e VG foram iguais ao VA ($9,86 \pm 4,49$ m³) em todas as espécies e classes estudadas (Figura 5). No geral, a espécie *A. lecointei* apresentou

maior volume ($11,56 \pm 5,1 \text{ m}^3$) do que *M. elata* e *M. paraensis* ($9,32 \pm 4,49$ e $8,99 \pm 3,32 \text{ m}^3$, respectivamente), que, por sua vez, apresentaram volumes similares a *S. oppositifolia* ($10,56 \pm 4,81 \text{ m}^3$) e o *Couratari* spp. ($9,87 \pm 4,38 \text{ m}^3$). Para todas as espécies houve um aumento significativo do volume com o aumento das classes diamétricas (1ª classe= $5,90 \pm 1,45$; 2ª classe= $9,30 \pm 2,01$ e 3ª classe= $14,64 \pm 3,77 \text{ m}^3$, Figura 5).

Tabela 2. Análise da variância em esquema fatorial ($5 \times 3 \times 3$) para as médias volumétricas em função dos fatores espécies, classes diamétricas e práticas de obtenção do volume, no município de Anapu, Pará. GL= Grau de liberdade; SQ= Soma dos quadrados; QM= Quadrados médios; F = Teste F e p = probabilidade do teste F.

Table 2. Factorial analysis of variance ($5 \times 3 \times 3$) for the volumetric means as a function of the factors of species, diametric classes and practices methods of measuring tree volume, municipality of Anapu, Pará. GL = Degree of freedom; SQ = Sum of squares; QM = Average squares; F = Test F and p = probability of test F.

Causa da Variação	GL	SQ	QM	F	p
Práticas	2	0,0171	0,0086	3,4086	0,0365
Espécies	4	0,0421	0,0105	4,1872	0,0034
Classes	2	0,8525	0,4262	169,7038	< 0,0001
Práticas x Espécies	8	0,0075	0,0009	0,3737	0,9326
Práticas x Classes	4	0,0008	0,0002	0,0848	0,9870
Espécies x Classes	8	0,0115	0,0014	0,5732	0,7980
Método x Espécies x Classes	16	0,0062	0,0004	0,1555	0,9999
Resíduo	114	0,2863	0,0025		

Tabela 3. Análise da variância da influência dos fatores espécies, classes diamétricas e prática de obtenção do volume sobre o volume de árvores no município de Anapu, Pará. GL= Grau de liberdade; SQ= Soma dos quadrados; QM= Quadrados médios; F= Teste F e p= probabilidade do teste F.

Table 3. Analysis of variance of the influence of the factors of species, diametric classes and methods of measuring tree volume on tree volume, municipality of Anapu, Pará. GL = Degree of freedom; SQ = Sum of squares; QM = Average squares; F = Test F and p = probability of test F.

Causa da Variação	GL	SQ	QM	F	p
Práticas	2	0,0171	0,0086	4,1100	0,0183
Espécies	4	0,0421	0,0105	5,0488	0,0008
Classes	2	0,8525	0,4262	204,6235	< 0,0001
Resíduo	150	0,3125	0,0021		

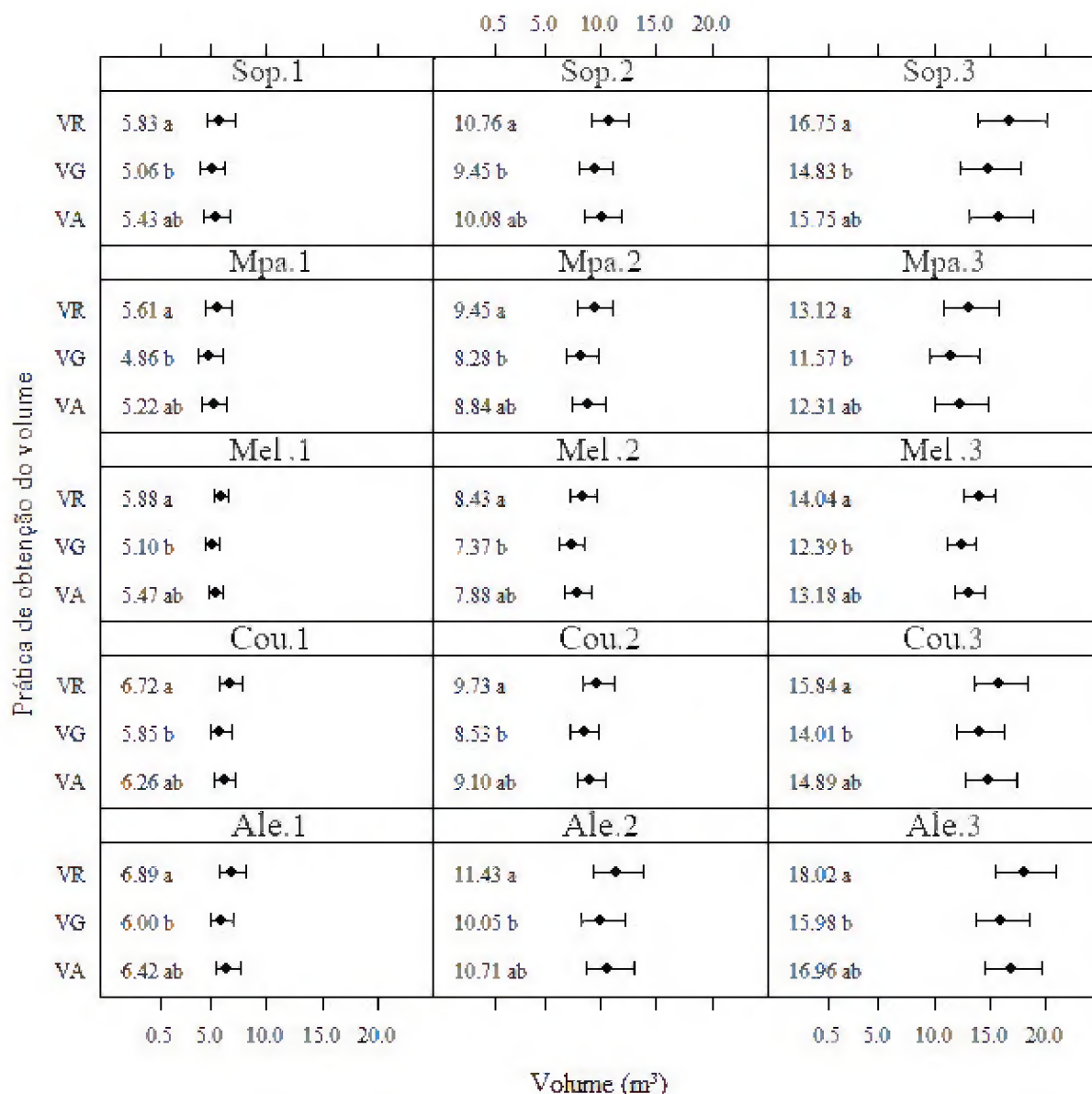


Figura 5. Médias e seus respectivos intervalos de confiança entre as práticas de obtenção dos volumes de árvores por espécies em cada classe de diâmetro (1, 2, 3). VR (volume real); VA (volume aproveitável); VG (volume geométrico). As espécies Sop (*Syzygiopsis oppositifolia*); Mel (*Manilkara elata*); Mpa (*Manilkara paraensis*); Ale (*Astronium lecointei*) e Cou (*Couratari* spp.). Letras diferentes denotam diferença estatística entre as práticas de cubagem por espécie, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Figure 5. Averages and their respective confidence intervals between the methods of measuring tree volume per species in each diameter class (1, 2, 3). VR (real volume); VA (usable volume); VG (geometric volume). The species are Sop (*Syzygiopsis oppositifolia*); Mel (*Manilkara elata*); Mpa (*Manilkara paraensis*); Ale (*Astronium lecointei*) and Cou (*Couratari* spp.). Different letters denote statistical difference between the measuring methods by species, using Tukey test at 5% of probability error.

Embora não tenha ocorrido diferença significativa entre o método de obtenção de volume VR e o VA, as perdas volumétricas ocorreram em 49% do total dos indivíduos mensurados. No geral, o volume de perda foi de 6,5% em relação ao VR. Do total de perda volumétrica, o percentual da presença de ocos (39%) foi maior que rachaduras (36%) e imperfeições no tronco (25%), respectivamente; o volume da perda aumentou com o aumento das classes diamétricas, sendo de 3,7% na 1ª classe, 5,81% na 2ª classe e 12% na 3ª classe.

As espécies *S. oppositifolia* e *Couratari* spp., apresentaram a maior porcentagem de perda do volume de madeira (22,79 e 22,39%, respectivamente). *S. oppositifolia* apresentou perdas provenientes de oco, imperfeições e rachaduras principalmente na 3ª classe diamétrica. As espécies *M. paraensis* também apresentou perdas similares, mas na 2ª classe de diâmetro. Já na espécie *M. elata*, as perdas volumétricas foram provenientes de rachaduras na base das toras, o que ocorreu em todas as classes diamétricas estudadas. A espécie *Couratari* spp. apresentou perdas decorrentes de imperfeições e rachaduras de forma desigual nas três classes diamétricas estudadas (Tabela 4).

Tabela 4. Percentual médio de perda em volume por espécie e por classe de diâmetro, estudados no Projeto de Desenvolvimento Sustentável Virola-jatobá, no município de Anapu, Pará.

Table 4. Average percentage loss in volume per species and diameter class studied in the Virola-jatobá Sustainable Development Project, municipality of Anapu, Pará, Brazil.

Espécies	Classes diamétricas	Oco	Imperfeições	Rachaduras
<i>Syzygiopsis oppositifolia</i> Ducke	0,60 a 0,79			
	0,80 a 0,99		2,44	
	1,00 a 1,20	16,07	3,57	0,71
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach	0,60 a 0,79	2,36		1,21
	0,80 a 0,99			5,36
	1,00 a 1,20			2,41
<i>Manilkara paraensis</i> (A.DC.) A. Chev.	0,60 a 0,79			
	0,80 a 0,99		7,44	4,76
	1,00 a 1,20	8,33		
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	0,60 a 0,79	8,09	2,5	
	0,80 a 0,99			
	1,00 a 1,20			0,59
<i>Couratari</i> spp.	0,60 a 0,79		3,16	
	0,80 a 0,99		3,15	0,39
	1,00 a 1,20		3,79	11,9

2.4 Discussão

Foi possível detectar diferenças estatísticas entre as práticas de obtenção de volume, sendo que o VR foi maior que o VG independente da espécie. Esse resultado foi diferente daquele encontrado por Ribeiro et al. (2014) na Floresta Nacional do Tapajós, no estado do Pará, onde não houve diferença estatística significativa entre o VR e o VG, embora o VR tenha sido menor do que o VG em 2,93%. Contudo, vale ressaltar que esses autores consideraram somente árvores inteiras, cubadas em diferentes secções ao longo do fuste e não consideraram as perdas como no presente estudo.

A diferença entre os volumes pode ter ocorrido devido a forma do fuste, que pode variar em uma mesma árvore folhosa. Geralmente, na base do tronco, as espécies de árvores folhosas apresentam a forma convexa no eixo longitudinal, com um ponto de inflexão variável em função da espécie, o qual se assemelha a um sólido geométrico do tipo neilóide truncado. Por isso, as práticas de cubagem rigorosa apresentam uma maior confiabilidade por abranger com maior precisão a real forma geométrica do fuste. Tal característica é muito importante para o ajuste de equações volumétricas, principalmente aquelas que darão suporte para o planejamento de futuras explorações dentro de uma unidade de manejo florestal sustentável (DE LEÓN; URANGA-VALENCIA, 2013).

Para garantir maior precisão volumétrica, o comprimento entre as secções no momento da cubagem rigorosa deve ser o menor possível (DE LEÓN; URANGA-VALENCIA, 2013). Assim, o cálculo do VR, que considera as secções do fuste a cada 2 metros, é mais acurado do que o método geométrico, que considera as secções variáveis a depender do tamanho das toras a serem traçadas, que em média são superiores a 2 metros (BUZA et al., 2006).

O perfil do fuste das espécies de árvores folhosas na Amazônia apresenta uma diminuição diamétrica na forma exponencial decrescente à medida que o comprimento das secções das toras aumenta, até a maior secção, quando o diâmetro pode ou não aumentar (DE LEÓN; URANGA-VALENCIA, 2013). Dessa forma, quanto maior o comprimento das secções do tronco na cubagem das árvores, maior a probabilidade de o volume ser superestimado (RIBEIRO et al., 2014). A forma das árvores também muda em função da retirada do VP, que ocorreram tanto nas primeiras secções, como nas últimas secções, deixando a forma do tronco mais uniforme e, conseqüentemente, diferenciando o VR do VG.

A complexidade do sítio e a fisionomia florestal podem interferir na variação da forma e na relação entre o diâmetro e a altura do fuste das árvores (AKINDELE; LEMAY,

2006). Os volumes podem sofrer variações entre espécies e dentro da mesma espécie, uma vez que as populações possuem indivíduos de diferentes idades e tamanhos (AKINDELE; LEMAY, 2006); essa variação pode explicar a variação encontrada dentro das espécies estudadas no presente trabalho.

Em relação às perdas de madeira durante o processo de exploração, o volume retirado das toras por fatores indesejáveis (6,5%) não diferenciou significativamente do VR e do VG. Mesmo assim, as perdas representaram um valor econômico considerável. Utilizando o valor comercializado de madeira em tora de US\$ 100,00 m⁻³, conforme Santana et al. (2012), o prejuízo seria de aproximadamente US\$ 3.630,76 advindos de 36,30 m³ de perda de madeira em tora, considerando as 53 árvores-amostra analisadas, que representam apenas 2,67% das árvores exploradas.

A presença de oco foi a principal fonte de perdas e ocorreu em quase todas as espécies. A espécie *S. opositifolia*, apresentou ocos que não foram detectados antes da derruba. O oco ou apodrecimento interno do tronco é uma doença florestal que ocorre internamente no fuste, na região do cerne, e o seu reconhecimento é muito difícil de ser detectado a olho nu (AUER; SANTOS, 2013). Uma das maneiras de detecção do apodrecimento interno se dá pelo teste do oco, realizado na base das árvores, no momento da derrubada; apesar de ser muito utilizado na Amazônia, esse teste não acusa a existência do oco caso esteja no centro ou no ápice dos troncos das árvores (AUER; SANTOS, 2013). Estudos fitopatológicos mostraram que essa podridão pode ocorrer tanto em indivíduos jovens quanto indivíduos maduros de qualquer espécie, porém é mais frequente em indivíduos maduros, o que pode explicar a maior perda volumétrica nas maiores classes diamétricas (DANIELLI et al., 2016).

Uma espécie pode apresentar diferente qualidade do tronco entre diferentes sítios, em função do tipo de solo, distribuição pluviométrica e vento; esses fatores ambientais podem favorecer a infecção de árvore por grupo de microrganismos associados, principalmente fungos, basidiomicetos (podridão branca e parda) e ascomicetos (podridão mole) e algumas bactéria, que penetram para o interior das árvores através das brechas provocadas por morte de galhos e injúrias no tronco. Esses micro-organismos atuam na superfície da parede celular de forma ordenada e sequencial e são capazes de degradar tanto a lignina, quanto a celulose e hemiceluloses (BOYCE, 1961).

Os resultados mostraram que os defeitos intrínsecos ao tronco das árvores, como as irregularidades na constituição e estrutura da madeira causada por tortuosidade ou presença de nó, ocorreram de forma generalizada, não sendo exclusivo de uma determinada espécie. A

tortuosidade, ou seja, os desvios permanentes da forma reta dos troncos das árvores podem ser de origem genética, condições de crescimento, inclinação do terreno, ação de ventos fortes e fototropismo e ocasionam alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, o que compromete o seu rendimento no momento do traçamento e arraste das toras, ou seja, quanto maior for a incidência e o volume desses defeitos, maior será a geração de perda de madeira (GARCIA et al., 2012).

Algumas espécies que apresentaram fendas e rachaduras provocadas pelo corte das árvores, como a *M. elata*, *M. paraensis* e a *Couratari* spp, também já apresentaram essas características em outros locais, como apontado por Amaral et al. (1998). Para Pereira (2012), as fendas e rachaduras são um dos principais fatores de aumento da perda de madeira extraída, que são provocadas principalmente pela liberação das tensões de crescimento no interior das árvores, que antes em pé, estavam em estado de equilíbrio. Sendo assim, a zona periférica da tora, sobre tração, tende, após o corte, a expandir e empurrar a face do corte para o exterior, causando rachaduras de topo no fuste (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Partes das perdas foram causadas por rachaduras. As tensões de crescimento são o resultado da ação de forças internas que atuam sobre os tecidos das árvores, proporcionando um papel muito importante na sustentação, rigidez e estabilidade contra ações de ventos forte, peso de sua própria copa, bem como resistência a inclinações topográficas (MATA et al., 2015). Essas tensões são originadas durante o amadurecimento das células do câmbio, que tendem a se contrair longitudinalmente e formar uma camada de células em condição de tração e tensão (ARCHER, 2013). As tensões longitudinais nas partes mais externas do fuste das árvores garantem uma estrutura reforçada, fornecendo resistências aos fatores edafoclimático (MATA et al., 2015). As células ao se contraírem longitudinalmente se expandem transversalmente para a medula das árvores, ocasionando uma tensão de compressão na parte interna, que reagem a certas cargas críticas, podendo causar rupturas no tronco. Em alguns casos, as árvores podem rachar com o impacto da queda ao solo (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Os efeitos das tensões de crescimento são comuns em madeira de baixa densidade, características de árvores jovens, ou árvores de rápido crescimento (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000). Existem técnicas para o corte de árvores que aliviam a tensão de crescimento das árvores, mas ainda assim algumas espécies apresentam rachaduras no fuste (AMARAL et al., 1998). O motivo das altas tensões de crescimento está relacionado diretamente com fatores genéticos, idade, tamanho da tora e taxa de crescimento das árvores tropicais (ARCHER, 2013).

2.5 Conclusão

As análises realizadas permitem concluir que:

- O volume geométrico foi menor do que o volume real, portanto os dados de volume geométrico provenientes do romaneio das toras não podem ser utilizados no ajuste de equações volumétricas para estimar volume de árvores em pé em unidades de manejo florestal implantada no município de Anapu, estado do Pará.
- Características morfológicas das espécies arbóreas estudadas não influenciaram nos volumes de madeira obtidos pelas três práticas avaliadas, assim como as classes diamétricas.
- Apesar de não haver diferença entre o volume aproveitável e o volume real, a perda de madeira ocorreu praticamente na metade das árvores avaliadas neste estudo; embora tenha sido um percentual pequeno de perda, ela pode gerar implicações negativas em termos financeiros para os manejadores.

2.6 Referências Bibliográficas

AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, n. 3, p. 41-48, 2006.

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

AMARAL, P.; VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; VIDAL, E. **Floresta para sempre: um manual para a produção de madeira na Amazônia**. Ananindeua: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 1998, 7 p.

ARCHER, R. R. **Growth stresses and strains in trees**. Berlin: Springer Science & Business Media, 3 ed. 2013, 239 p.

AUER, C. G.; SANTOS, A. F. A podridão do cerne em árvores vivas de Eucalipto. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, Colombo, Paraná, 2013.

AZEVEDO, A. M.; ANDRADE JÚNIOR, V. C.; FERNANDES, J. S. C. Transformação Box-Cox na homocedasticidade e normalidade uni e multivariada em experimentos de batata-doce. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 34, n. 1, p. 93-101, 2015.

BARRETO, W. F.; LEÃO, F. M.; MENEZES M.C.; SOUZA D.V. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 321-329, 2014.

BOYCE, J. S. **Forest pathology**. New York: McGraw-Hill, 1961, 572p.

BRASIL. Instrução Normativa n.º 5 de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, treze de dezembro de 2006. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/>>. Acesso em: 27 fev. 2018. a.

BRASIL. Norma de Execução n.º 1, de 24 de abril de 2007. Institui, no âmbito desta Autarquia, as Diretrizes Técnicas para Elaboração dos Planos de Manejo Florestal Sustentável – PMFS de que trata o art. 19 da Lei 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, trinta de abril de 2007. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/>>. Acesso em: 27 fev. 2018. b.

BRASIL. Resolução Conama n.º 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seis de fevereiro de 2009. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=597>. Acesso em 19/01/2018.

BRASIL. Instrução Normativa n.º 10 de 08 de maio de 2015. Defini procedimentos de organização física de produtos florestais madeireiros em áreas de exploração florestal e em depósitos e pátios de estocagem de empreendimentos industriais ou comerciais, para fins de controle do rastreamento de produtos oriundos de Planos de Manejo Florestais, Autorizações de Supressão de Vegetação em Empreendimentos sob Licenciamento Ambiental e Autorizações de Uso Alternativo do Solo expedidas pelos órgãos ambientais competentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, doze de maio de 2015. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0010-08052015.pdf>>. Acesso em: 04/04/2018.

BRASIL. Instrução Normativa n.º 21, de 24 de dezembro de 2014. Dispõe sobre o funcionamento e utilização do Documento de Origem Florestal (DOF). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, vinte e sete de dezembro de 2014. Disponível em: <www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/formularios/IN_21_DE_2014.pdf>. Acesso em 04/04/2018.

BUZA, A. G.; TOURINHO, M. M.; SILVA, J. N. Caracterização da colheita florestal em Cabinda, Angola. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v. 45, n. 2, p. 59-78, 2006.

DANIELLI, F. E.; GIMENEZ, B. O.; OLIVEIRA, C. K. A.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Modelagem do rendimento no desdobro de toras de *Manilkara* spp.(Sapotaceae) em serraria do estado de Roraima, Brasil Yield modeling in sawing logs of *Manilkara* spp.(Sapotaceae) in sawmill in the state of Roraima, Brazil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 641 – 651, 2016.

DE LEÓN, G. C.; URANGA-VALENCIA, L. P. Theoretical evaluation of Huber and Smalian methods applied to tree stem classical geometries. **Bosque**, Valdivia, v. 34, n. 3, p. 311 – 317, 2013.

FRANCEZ, L. M. B.; BATISTA, F. J.; TAKEHANA, C. L. I.; BARROS, P. L. C.; SOUZA, D. V.; CORUMBÁ, W. C.; RAMOS, E. M. L. S. **Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável – PMFS**. Belém: Editora Edufra, 2017, 100p.

GARCIA, F. M.; MANFIO, D. R.; SANSÍGOLO, C. A.; MAGALHÃNS, P. A. D. Rendimento no desdobro de toras de Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Tauari (*Couratari guianensis*) segundo a classificação da qualidade da tora. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 14, p. 468-474, 2012.

GOMES, K. M. A.; SILVA-RIBEIRO, R. R.; GAMA, J. R. V.; ANDRADE, D. F. C. Eficiência na estimativa volumétrica de madeira na Floresta Nacional do Tapajós. **Nativa**, Sinop, v.6, n.2, p. 170-176, 2018.

LANSSANOVA, L. R.; SILVA, F. A.; SCHONS, C. T.; PERERIRA, A. C. D. S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **Biofix Scientific Journal**, Paraná, v. 1, n. 1, p. 109-115, 2018.

LATORRACA, J. D. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

MATA, A. G.; CASTRO, R. V. O.; CORREIA, A. C. G.; REIS, G. G.; REIS, M. D. G. F.; ROSADO, A. M. (2015). Interação árvores e ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 523-536, 2015.

NICOLETTI, M. F.; BATISTA, J. L. F.; CARVALHO, S. D. P. C.; CASTRO, T. N.; HESS, A. F. Exatidão de dendrômetros ópticos para determinação do volume de árvores em pé. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 395-404, 2015.

PEREIRA, R. S.; GUIMARÃES, P. B. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; VALE, A. T.; ROBERT, R. C. G. Avaliação da segurança e ocorrência de defeitos na operação de corte semimecanizado de florestas de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 511-518, 2012.

RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; MELO, L. O. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 605-612, 2014.

SANTANA, A. C.; SANTOS, M. A. S.; SANTANA, Á. L.; YARED, J. A. G. O valor econômico da extração manejada de madeira no baixo Amazonas, estado do Pará. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 527-536, 2012.

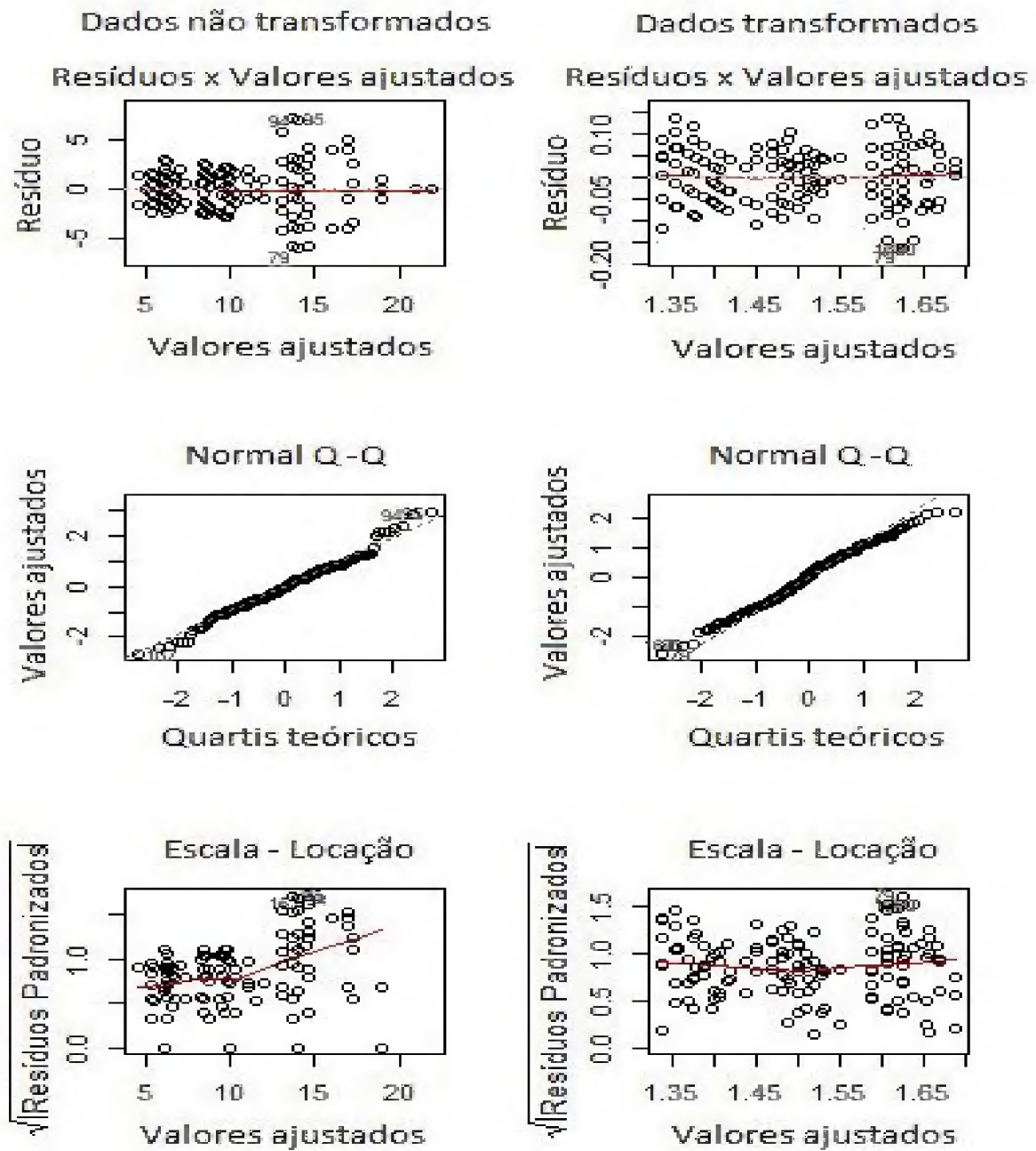
SILVA, E. M.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 5, p. 631-636, 2014.

Apêndice 1

Teste de normalidade: O gráfico dos resíduos versus valores ajustados para os dados volumétricos não transformados, mostra uma tendência heterocedástica, uma vez que os resíduos estão muito dispersos em torno do zero, principalmente acima de 15 m³ estimado. Por outro lado, os resíduos dos dados volumétricos transformados estão aleatoriamente distribuídos bem próximo do 0, sem nenhum comportamento ou tendência, indicando que a variância dos resíduos é homocedástica (Figura 1).

O gráfico Q-Q normal para os dados de volumes transformados, apresentou uma linearidade com aderência acentuada dos valores ajustados com a reta de referência da normalidade, sugerindo que os dados são normalmente distribuídos, diferentemente dos dados de volume não transformados (Figura 1).

O gráfico da escala de locação mostra que a raiz quadrada dos resíduos padronizados, para os dados transformado foi mais homogênea ao longo dos valores ajustados, indicando que os dados transformados não têm influência significativa na normalidade dos dados volumétricos, diferente dos dados não transformados, onde a raiz quadrada dos resíduos padronizados se dispersa a partir do 10 m³ estimado (Figura 1).



Apêndice 1. Figura 1: Diagnóstico gráfico da distribuição dos resíduos para dados não transformado e os dados transformados pela potência de λ (0.182).

3 QUAL O TAMANHO MÍNIMO DE AMOSTRA PARA COMPOR UMA EQUAÇÃO DE VOLUME PARA ESPÉCIES FLORESTAIS DA AMAZÔNIA?²

Resumo

Determinar o mínimo de árvores-amostra para desenvolver equações volumétricas com precisão é muito importante, pois diminui o tempo e os custos do levantamento em campo. Desta forma, o objetivo deste trabalho buscou determinar o mínimo de árvores-amostras a serem cubadas para seis espécies de valor comercial. A pesquisa foi desenvolvida em uma unidade de manejo florestal localizada no município de Novo Repartimento, Pará. Foram obtidos o volume real de 318 árvores-amostra pertencentes a seis espécies. Para determinar o número mínimo de árvores-amostra para cada espécie e para o conjunto das espécies, foram realizadas 1000 simulações aleatórias pelo processo de Bootstrap, para tamanhos de amostra diferentes (5, 6, ..., n - 1). Em cada simulação, foram ajustados os modelos volumétricos de Husch e Schumacher-Hall e obtidos o Índice de Confiabilidade (IC%) e o Limite de Erro admissível (LEa%) para cada tamanho de amostra. Para o LEa%, foram considerados seis limites de erro admissíveis variando entre 10 e 35%. O teste t unilateral a esquerda, foi utilizado para comparar a média do LEa% com a média do IC%, para cada tamanho de amostra. O mínimo de árvores-amostra foi determinado quando o IC% foi igual ou menor que o LEa%. Para Schumacher-Hall, considerando um limite de erro de 20%, são necessários o mínimo de 29 árvores-amostra para cada espécie e 81 árvores-amostra para o conjunto das espécies. Já para Husch a um limite de erro de 35%, são necessárias 39 árvores-amostra para cada espécie e 158 árvores-amostra para o conjunto das espécies.

Palavras-chave: Volume comercial; cubagem rigorosa; regressão; manejo florestal; amostragem.

² Este artigo segue as normas do periódico Acta Amazonica

WHAT IS THE MINIMUM SAMPLE SIZE FOR COMPOSING A VOLUME EQUATION FOR FOREST SPECIES OF THE AMAZON?

Abstract

We aimed to determine how many sample-trees are necessary to develop volumetric equations accurately. This information can contribute to reduce time and costs of the field survey. The research was developed for six species of commercial value in a forest management unit located in the municipality of Novo Repartimento, Pará. The actual volume of 318 sample-trees belonging to six species was measured. To determine the minimum number of sample-trees required for each species and for all species, 1000 random simulations were performed by Bootstrap process for different sample sizes (5, 6, ..., n - 1). In each simulation, the Husch and Schumacher-Hall volumetric models were adjusted and the Reliability Index (IC%) and the Permissible Error Limit (LEa%) were obtained for each sample size. For the LEa%, six permissible error limits were considered, varying between 10 and 35%. The one-sided left-tailed t test was used to compare the mean LEa% with the mean CI%, for each sample size. The minimum sample-trees required were determined when the CI% was equal to or less than the LEa%. For Schumacher-Hall, considering a 20% error limit, the minimum of 29 sample-trees was required for each species and 81 sample-trees for all the species. For Husch, with an error limit of 35%, it is necessary 39 sample-trees for each species and 158 sample-trees for all the species.

Keywords: Commercial volume; strict cubing; regression; Forest management; sampling

3.1 Introdução

O volume é uma das expressões quantitativas mais importantes para o planejamento e a execução do plano de manejo florestal sustentável na Amazônia. Estimativas precisas, principalmente de árvores individuais pertencentes às espécies de valor comercial, garantem uma avaliação apropriada do estoque de madeira e do potencial produtivo para exploração futura (Masota 2014; Saarinen et al. 2017), assegurando, assim, um melhor controle da produção de madeira em um empreendimento florestal (Barreto et al. 2014).

O estado do Pará gera uma produção anual de madeira em tora de aproximadamente de 5,2 milhões de metros cúbicos por ano. Considerando o valor de 77 US\$.m⁻³ de madeira em tora, calculado para a região do Baixo Amazonas (SEFA 2017), o setor madeireiro do estado do Pará arrecada cerca de 400 milhões de dólares por ano em toras, sendo o maior produtor em madeira originada das florestas nativas brasileiras (IBGE 2016).

Devido a necessidade de controlar com precisão a quantidade de volume de madeira produzida na Amazônia brasileira, as equações volumétricas específicas passaram a ser exigidas por lei, para o cálculo do volume de árvores em pé em área de manejo florestal sustentável, que possui mais de uma unidade de produção anual (UPA), devendo ser aplicada a partir da segunda unidade explorada (Brasil 2009). Até então, o volume de madeira era determinado pela multiplicação do volume do cilindro com fator de forma 0.7, proposto por Heinsdijk (1958), ou através do ajuste de equações previamente existentes na literatura, que servem como facilitadoras para estimar o volume de árvores em pé (Rolim et al. 2006).

A aplicação de equações disponíveis na literatura deve ser cuidadosamente utilizada, pois as condições do sítio influenciam na relação entre as variáveis diâmetro e altura e, conseqüentemente, no volume das árvores (Feldpausch et al. 2011; Sande et al. 2017). Por isso, ajustar equações volumétricas específicas para cada sítio a ser manejado resulta em esforço amostral expressivo, devido a variância dos dados dendrométricos existente entre as espécies de uma mesma área florestal (Akindele e Lemay 2006). Esse aspecto é um problema no ajuste de modelos, principalmente nas florestas amazônicas que apresentam alta diversidade de espécie (Ter-Steege et al. 2016).

Para diminuir a variância dos dados é preciso um número suficiente de árvores-amostra (fustes arbóreos) que represente a população estudada, pois uma amostra de tamanho inadequado pode propiciar o ajuste de equações volumétricas menos precisos ou tendenciosos (Sullivan et al. 2018). Por outro lado, um número excessivo de árvores-amostra eleva o tempo

de trabalho em campo e conseqüentemente aumentam os custos para as empresas florestais (Guimarães e Leite 1996).

Diversos estudos realizados no Brasil revelam um número muito variável de árvores-amostra utilizadas no ajuste de equações volumétricas. Para uma área florestal, esse número tem variado entre 50 e 386 indivíduos no estado do Amazonas, entre 385 e 518 no Amapá e entre 30 e 2500 no Pará e para cada espécie em separado, o número de amostra variou entre 7 e 12 no estado do Amazonas e entre 26 e 210 no Pará (Figueiredo-Filho et al. 2014). Para outras florestas brasileiras, não-amazônicas, o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) utilizou equações de volume advindas do ajuste de 225 árvores-amostra para o estado do Ceará, 266 árvores-amostra para Sergipe e 2127 árvores-amostra para Santa Catarina (SFB 2010).

Para o ajuste de equação volumétrica de árvores comerciais em unidades de manejo florestal no estado do Pará, a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) sugere a cubagem de 150 árvores, sendo 100 para o ajuste do modelo e 50 para a validação do modelo ajustado (Francez et al. 2017); Entretanto, esses autores reconhecem que efetivamente, pouca atenção tem sido dada para o número mínimo de árvores-amostra a ser empregado no ajuste de equações de volume na região amazônica.

Diante da importância do setor florestal na Amazônia brasileira, em especial no estado do Pará, esse trabalho visa contribuir com o manejo florestal testando a hipótese de que independente da equação a ser utilizada, o mínimo de 30 árvores-amostra para cada espécie, citado por Figueiredo-Filho et al. (2014) para o estado do Pará, garantem ajustes de modelos volumétricos viáveis e que, até 100 árvores-amostra, como sugerido por Francez et al. (2017), garantem um ajuste aceitável para estimativa do volume para todo o conjunto das espécies. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi determinar o número mínimo de árvores a serem cubadas para seis espécies de valor comercial em uma unidade de manejo florestal empresarial, localizada no município de Novo Repartimento no estado do Pará, Brasil.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Caracterização Da Área De Estudo

A pesquisa foi desenvolvida em uma unidade de manejo florestal (UMF) empresarial, com uma área de 78.233,00 ha, localizada no município de Novo Repartimento, Pará (03° 10' 06,4'' S e 51° 17' 55,5'' W). A vegetação é caracterizada como Floresta Ombrófila Densa, o relevo é do tipo plano, sendo na sua maioria levemente ondulado, com predominância de Argissolos vermelho amarelo. O clima é quente e úmido, do tipo Am

segundo a classificação de Köppen, com precipitações anuais entre 1.400 mm a 2.100 mm e temperatura média maior que 26 °C e menor que 27.3 °C (Alvares et al. 2013; IBGE 2016).

3.2.2 Amostragem

No ano de 2003, foram explorados 19,144 m³ há⁻¹ de madeira comercial, o que corresponde a 11.230 árvores distribuídas em 72 espécies na segunda UPA (2.778 ha), que correspondeu a 3,55% da área UMF. Após a derruba, foram cubados 318 árvores-amostra pertencentes a seis espécies (Tabela 5). Todas as árvores foram identificadas pelo nome popular, com auxílio de um identificador botânico com experiência na identificação das espécies da região. As árvores-amostra tiveram dimensões que variaram entre 0,51 e 1,46 m de DAP e entre 6,38 e 30,22 m de altura do fuste (Tabela 5).

Tabela 5. Número de árvores-amostra (N), por espécie, utilizadas para o ajuste do modelo volumétrico no município de Novo Repartimento, Pará. Valores médio (med.), mínimo (min.) e máximo (max.) do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura comercial (h_c), ambos medidos em metros (m).

Espécies	N	DAP (m)			h _c (m)		
		Min.	Máx.	Méd.	Min.	Máx.	Méd.
<i>Couratari</i> spp.	40	0,52	1,19	0,85	8,00	30,22	21,46
<i>Eschweilera ovata</i> (Cambess.) Miers.	41	0,51	1,02	0,67	8,55	18,72	15,20
<i>Licaria canella</i> (Meissn.) Kosterm.	71	0,54	1,18	0,81	7,35	23,48	13,42
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach	56	0,56	1,18	0,85	6,38	30,00	19,43
<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. e Eichler) Pierre	68	0,58	1,27	0,86	8,00	23,75	15,89
<i>Parkia multijuga</i> Benth.	42	0,55	1,46	0,90	8,00	22,16	15,68
Conjunto das espécies	318	0,51	1,46	0,83	6,38	30,22	16,53

O volume real (VR) do fuste de cada árvore-amostra foi determinado com o auxílio de uma trena métrica, por meio de cubagem rigorosa realizada pelo método de Smalian com medições diamétricas sucessivas de 2 em 2 m ao longo do fuste (com casca) até a última secção, que podia ser menor ou igual a 2 m de comprimento (FRANCEZ et al. 2017) (Figura 6), conforme a equação:

$$VR = \sum_{i=1}^n (g1 + g2) * L/2$$

Equação 1 (Smalian)

onde: VR = Volume real (m³), g₁ = Área transversal da secção maior (m²), g₂ = Área transversal da menor (m²), g₂ = Área transversal da menor (m²), L = Comprimento da secção (m), e n = Número de secções.

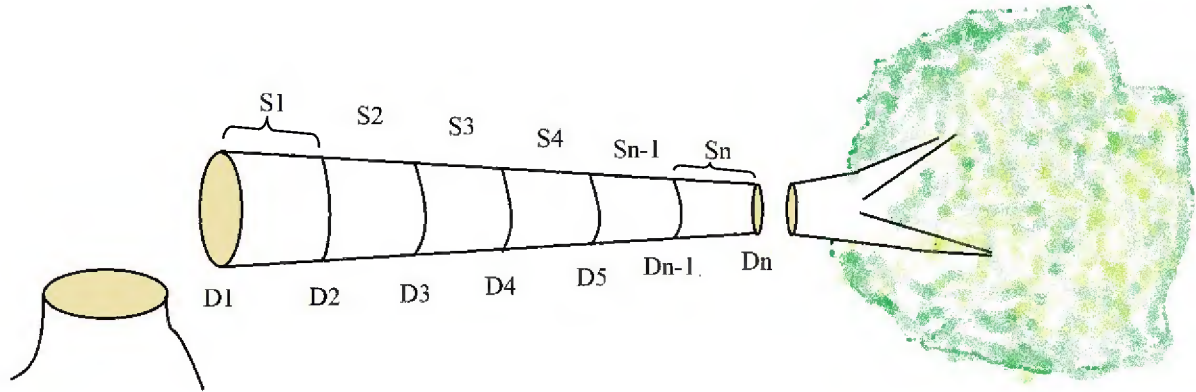


Figura 6: Método de Smalian para a cubagem rigorosa de cada árvore-amostra, Onde: S são as seções de 2 em 2m, D os diâmetros de cada extremidade das seções e Sn é a última seção ($\leq 2m$). Fonte: Autor.

3.2.3 Modelagem e Análises estatísticas

Para estimar o número mínimo de árvores-amostra para cada uma das seis espécies avaliadas e para o conjunto das seis espécies, foram utilizados os modelos logarítmicos de simples entrada de Husch (equação 2) e o modelo logarítmico de dupla entrada proposto por Schumacher-Hall (equação 3). Esses modelos foram sugeridos por diversos autores para Amazônia brasileira, principalmente em termos de precisão da estimativa volumétrica (Rolim et al. 2006; Barreto et al. 2014; Gimenez et al. 2015; Lansanova et al. 2018).

$$\ln(v) = \ln \tilde{\beta}_0 + \tilde{\beta}_1 \ln(\ln DAP) + \tilde{\beta}_2 (\ln h_c) + \epsilon_i \quad \text{equação 2}$$

$$\ln(v) = \ln \tilde{\beta}_0 + \tilde{\beta}_1 (\ln DAP) + \epsilon_i \quad \text{equação 3}$$

onde: v = volume total do fuste da árvore (m³), $\ln(\beta_0)$ = Coeficiente intercepto; β_1 e β_2 = Coeficiente angular, DAP = diâmetro à altura do peito (cm), h_c = Altura comercial (m), ln = logaritmo neperiano.

Para cada modelo testado, foram realizadas 1000 simulações aleatórias pelo processo de reamostragem com reposição, conhecido como Bootstrap (Tibshirani e Efron 1993). Essa técnica foi repetida para tamanhos de amostra diferentes contendo 5, 6, 7... até n - 1 árvores-amostra, para cada espécie e para o conjunto delas. A cada simulação nos diferentes tamanhos de amostra, foram ajustados os modelos volumétricos a fim de se obter a média percentual do

Índice de Confiabilidade para estimativa da média (IC%); equação 4). O IC% é a razão entre o Erro Padrão da Estimativa ($S_{y.x\%}$) e a raiz quadrada do tamanho da amostra, sendo que seu valor expressa o quanto o modelo erra, em média, ao estimar a média da variável de interesse, sendo desejável que esse valor seja o mais baixo possível (Sullivan et al. 2018).

Nas mesmas simulações, também foi calculado o Limite de Erro admissível (LEa%) para cada tamanho de amostra (equação 5). O LEa% representa, em termos relativos, a magnitude do erro cabível para a estimativa da média da variável independente no ajuste de cada um dos modelos em função do tamanho da amostra. Para esse estudo foram considerados seis limites de erro is (10, 15, 20, 25, 30 e 35%) para o intervalo de confiança de 95% (Felfili et al. 2011).

$$IC\% = \frac{S_{y.x\%}}{\sqrt{n}} \quad \text{equação 4}$$

$$LEa\% = \frac{LE\%}{\sqrt{n}} \quad \text{equação 5}$$

onde: IC% (%) = média percentual do índice de confiabilidade, $S_{y.x\%}$ (%) = erro padrão da estimativa em porcentagem, n = Número de unidade de amostra, LEa% (%) = percentual do limite de erro admissível, LE% (%) = percentual do limite de erro.

Os resultados dos diferentes ajustes simulados foram analisados primeiramente de forma gráfica, com o intuito de comparar a tendência média do IC% em função da variação do tamanho da amostra entre os diferentes LEa% para os modelos de simples e dupla entrada. Dessa forma, o número mínimo de árvores-amostra foi determinado quando o ponto em que a tendência média do IC% se sobrepôs aos IC's% (obtidos para cada uma das simulações), que atenderam a precisão requerida, ou seja, os valores pré-estabelecidos de probabilidade de acerto (95%) para um determinado limite de erro em porcentagem (10, 15, 20, 25, 30 e 35%), garantindo, assim, um modelo ajustado com precisão a partir do momento da estabilização da tendência média do IC%.

O teste t unilateral à esquerda, com 99% de significância, foi utilizado para validar o número mínimo de árvores-amostra, comparando a média do LEa% com a tendência média do IC%, obtidos através dos ajustes volumétricos realizados para cada uma das 1000 simulações para cada tamanho de amostra, onde a hipótese nula testada (H_0) foi que o IC% é igual ou menor que LEa%. Sendo assim, o mínimo de árvores-amostra foi determinado quando o IC% foi igual ou menor estatisticamente do que o LEa% até a tendência da estabilização do erro padrão da média do IC% (Brown e Murphy 1996). Todas as análises

foram realizadas usando o R 3.4.4 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, AT) com o auxílio do pacote latticeExtra (Sarkar e Andrews 2018).

3.3 Resultados

A média do IC% estimado por meio das 1000 simulações, apresentou uma variância muito baixa tanto para as árvores-amostra de cada espécie quanto para o conjunto das espécies (Tabela 6 e 7). O comportamento das curvas da tendência média do IC% em todos os níveis de limites de erro avaliados nesse estudo apresentaram disposição em exponencial negativa, tanto para o modelo de dupla quanto para o modelo de simples entrada para cada espécies individualmente e para o conjunto das espécies (Apêndice 2 e 3).

Tabela 6. Comparação entre o limite de erro admissível (LEa) e o índice de confiabilidade (IC%) obtido do ajuste do modelo volumétrico de dupla entrada para cada espécie e para o conjunto das espécies, no município de Novo Repartimento, Pará. n = número mínimo de árvores-amostra, LE = limite de erro, ns = número de simulações, s^2 IC% = variância do índice de confiabilidade, $s_{\bar{x}}$ IC% = erro padrão da média, t calc. = t calculado, t tab. = t tabelado e p = probabilidade do teste t.

Espécie	n	LE%	média LEa%	média IC%	ns	s^2 IC%	$s_{\bar{x}}$ IC%	t calc.	t tab.	p
<i>Couratari</i> spp.	29	20	3.71	3.06	1000	0.33	0.02	-36.04	-1,65	< 0,01
<i>E. ovata</i>	23	15	3.13	2.58	1000	0.29	0.02	-32.12	-1,65	< 0,01
<i>L. canela</i>	23	15	3.13	2.96	1000	0.33	0.02	-9.520	-1,65	< 0,01
<i>M. elata</i>	25	15	3.00	2.69	1000	0.27	0.02	-19.35	-1,65	< 0,01
<i>M. venulosa</i>	29	20	3.71	3.10	1000	0.30	0.02	-35.39	-1,65	< 0,01
<i>P. multijuga</i>	29	15	2.785	2.35	1000	0.25	0.02	-27.32	-1,65	< 0,01
Conjunto das espécies	81	20	2.22	1.79	1000	0.04	0.01	-66.47	-1,65	< 0,01

No modelo de dupla entrada a tendência média do IC% atendeu a precisão para 20% de LEa%, tanto para *Couratari* spp., quanto para *M. venulosa*, com poucas árvores-amostra analisadas (Figura 7, Apêndice 2). O teste t, comprovou que a tendência média do IC% foi menor que a média do LEa% para 20% (Tabela 6). O erro padrão do IC%, tende à estabilização a partir de 29 árvores-amostra tanto para *Couratari* sp. quanto para *M. venulosa*, apresentando respectivamente, 85% e 87% das simulações ajustadas com precisão (Tabela 6, Figura 8).

Tabela 7. Comparação entre o limite de erro admissível (LEa) e o índice de confiabilidade (IC%) obtido do ajuste do modelo volumétrico de simples entrada para cada espécie e para o conjunto das espécies, no município de Novo Repartimento, Pará. n = número mínimo de árvores-amostra, LE = limite de erro, ns = número de simulações, s^2 IC = variância do índice de confiabilidade, $s_{\bar{x}}$ IC% = erro padrão da média, t calc. = t calculado, t tab. = t tabelado e p = probabilidade do teste t.

Espécie	n	LE%	média LEa%	média IC%	ns	s^2 IC%	$s_{\bar{x}}$ IC%	t calc.	t tab.	p
<i>Couratari</i> spp.	37	35	5.75	5.27	1000	1.12	0.03	-14.52	-1.65	< 0,01
<i>E. ovata</i>	30	20	3.65	3.02	1000	0.19	0.01	-45.71	-1.65	< 0,01
<i>L. canela</i>	32	25	4.42	3.95	1000	0.35	0.02	-25.46	-1.65	< 0,01
<i>M. elata</i>	35	30	5.07	4.97	1000	0.86	0.03	-3.57	-1.65	< 0,01
<i>M. venulosa</i>	39	25	4.80	4.05	1000	0.21	0.01	-52.43	-1.65	< 0,01
<i>P. multijuga</i>	39	25	4.00	3.19	1000	0.39	0.02	-41.42	-1.65	< 0,01
Conjunto das espécies	158	35	2.78	2.53	1000	0.04	0.01	-39.41	-1.65	< 0,01

Para as demais espécies, a tendência média do IC% atendeu a precisão requerida para 15% de LEa%, sendo validado pelo teste t ($p < 0,01$), onde a tendência média do IC% foi menor que a média do LEa% para 15% (Tabela 6, Figura 7, Apêndice 2). O erro padrão do IC%, tende à estabilização a partir de 23 árvores-amostra para *E. ovata* e *L. canella*, seguida de 25 para *M. elata*, 29 para *P. multijuga* (Tabela 6). Essas espécies apresentaram respectivamente 83,1%, 62,4%, 74,1% e 77,1% simulações ajustadas com precisão (Figura 8).

Já para o conjunto de todas as espécies juntas, a tendência média do IC% atendeu a precisão requerida para 20% de LEa%, sendo validado pelo teste t ($p < 0,01$). A partir de 81 árvores-amostra, o erro padrão do IC% tendeu a estabilização, apresentando 98% dos modelos ajustados com precisão (Tabela 6, Figura 8, Apêndice 2).

Para o modelo de simples entrada, a tendência média do IC% atendeu a precisão requerida com 35% de LEa% para a espécie *Couratari* spp., 30% para *M. elata*, 25% para *L. canella*, *M. venulosa*, *P. multijuga* e 20% para *E. ovata* (Figura 9, Apêndice 3). O teste t confirmou que a tendência média do IC% foi menor que o LEa% para essas seis espécies (Tabela 7). O erro padrão do IC% tendeu a estabilização a partir de 37 árvores-amostra para *Couratari* spp., 30 para *E. ovata*, 32 para *L. canella*, 35 para *M. elata*, 39 para *M. venulosa* e *P. multijuga* (Tabela 7), a porcentagem das simulações ajustadas com precisão foi de 67%, 83,4%, 96,2%, 75,6%, 90,7% e 90,1%, respectivamente (Figura 10).

Para o conjunto de todas as espécies juntas, a tendência média do IC% atendeu a precisão requerida para 35% de LEa%, sendo validado pelo teste t ($p < 0,01$). O erro padrão

do IC%, tende à estabilização a partir de 158 árvores-amostra (Tabela 7, Figura 9, Apêndice 3), apresentando 87% dos modelos ajustados com precisão (Figura 10).

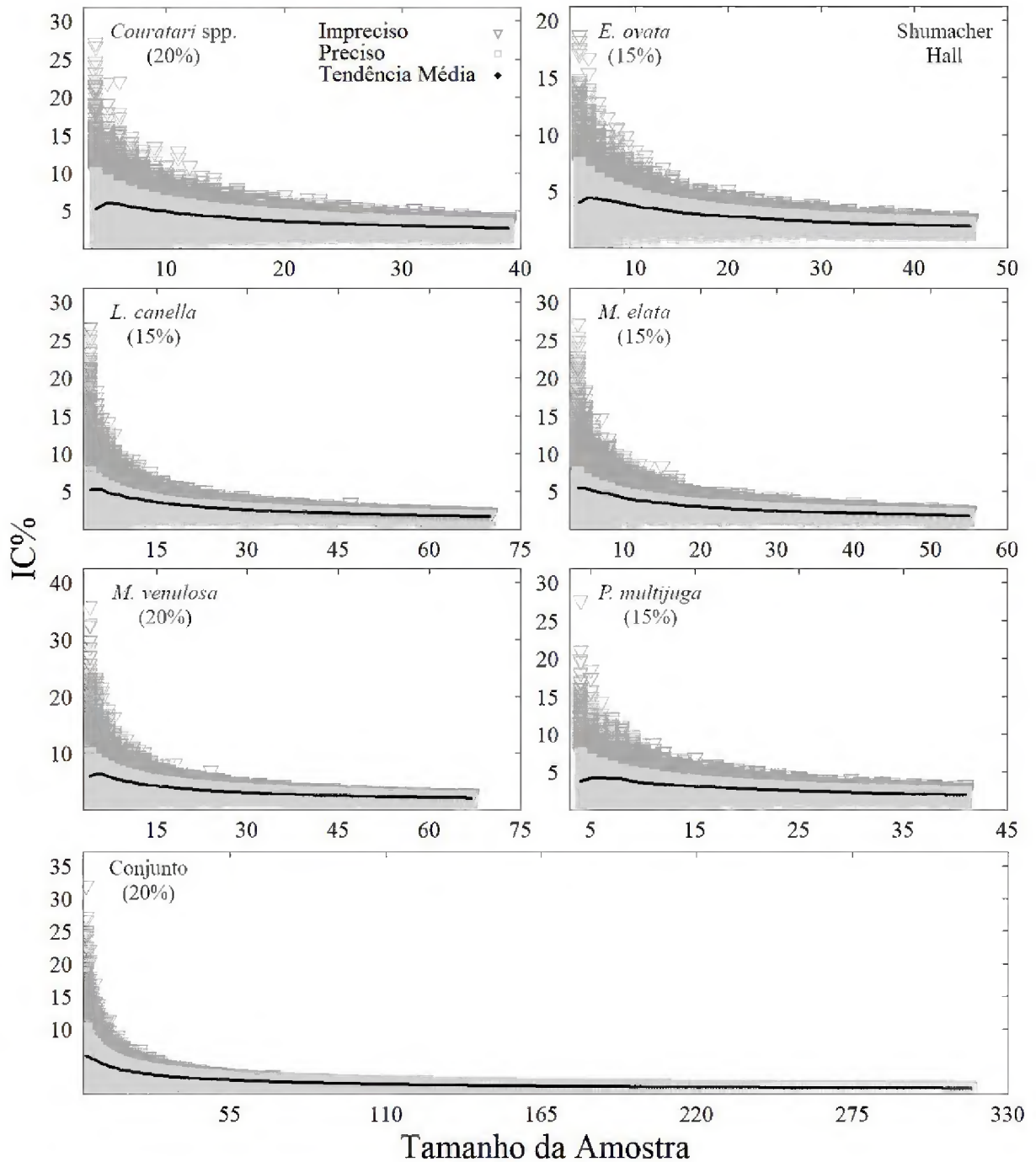


Figura 7: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa%), para cada espécie e para o conjunto das espécies no ajuste do modelo volumétrico de dupla entrada.

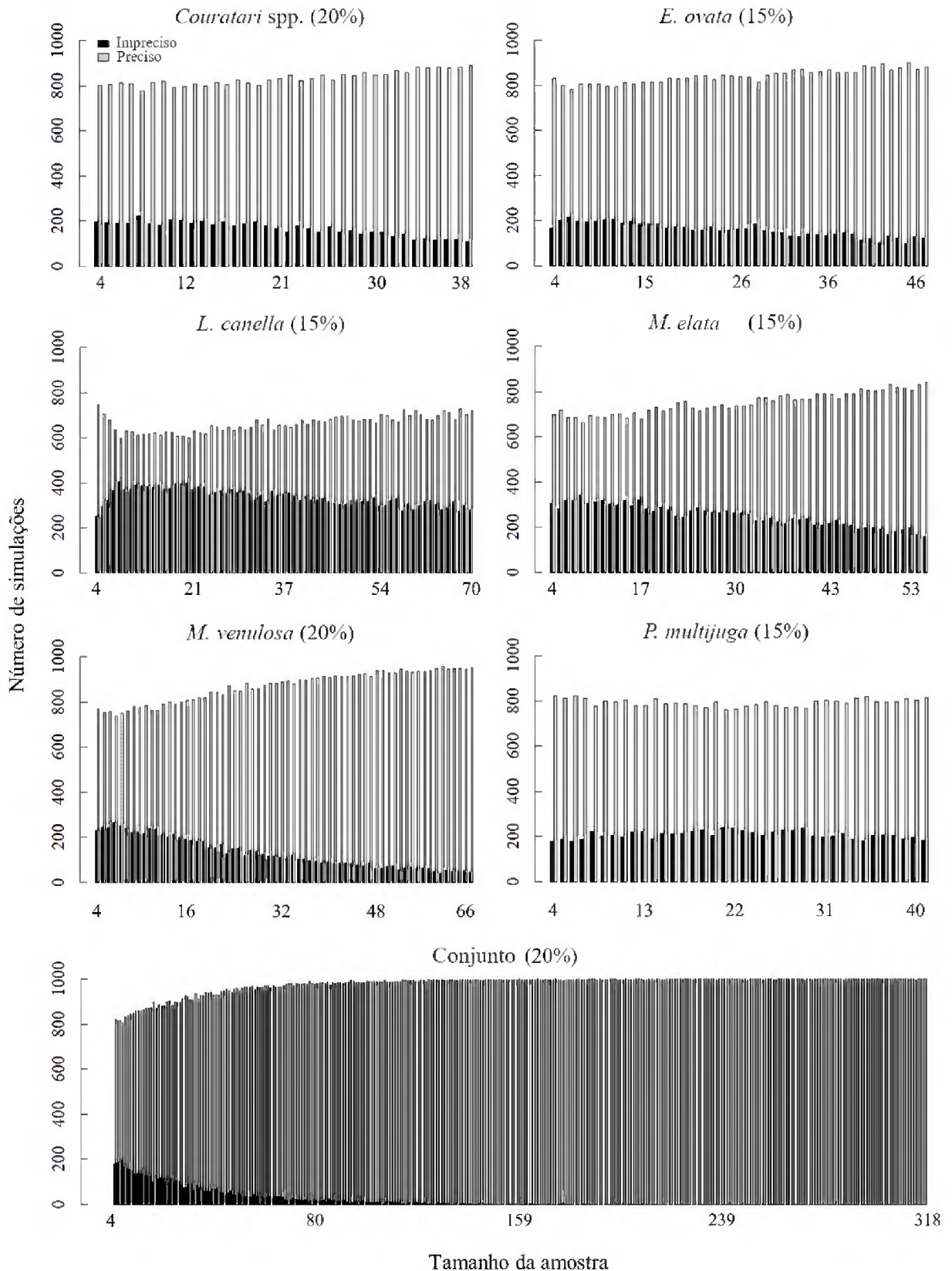


Figura 8. Comparação entre o número de ajustes simulados que apresentaram a precisão requerida (cinza) e o número de ajustes simulados, que não apresentaram a precisão requerida (preto), após o ajuste do modelo de dupla entrada, no município de Novo Repartimento, Pará. Ente parênteses encontram-se o LEa% para cada espécie e para o conjunto das espécies.

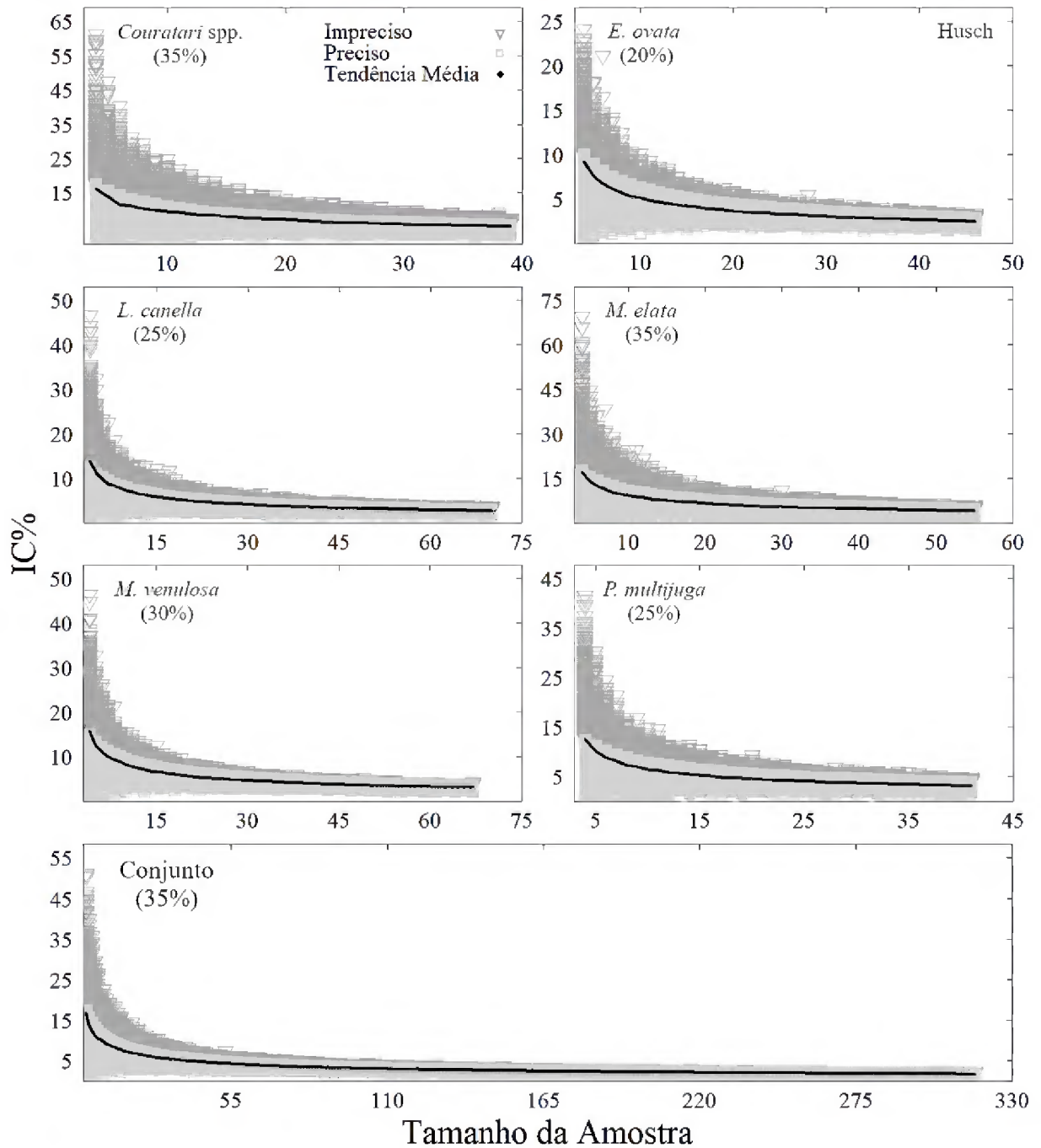


Figura 9: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível, para cada espécie e para o conjunto das espécies no ajuste do modelo volumétrico de simples entrada.

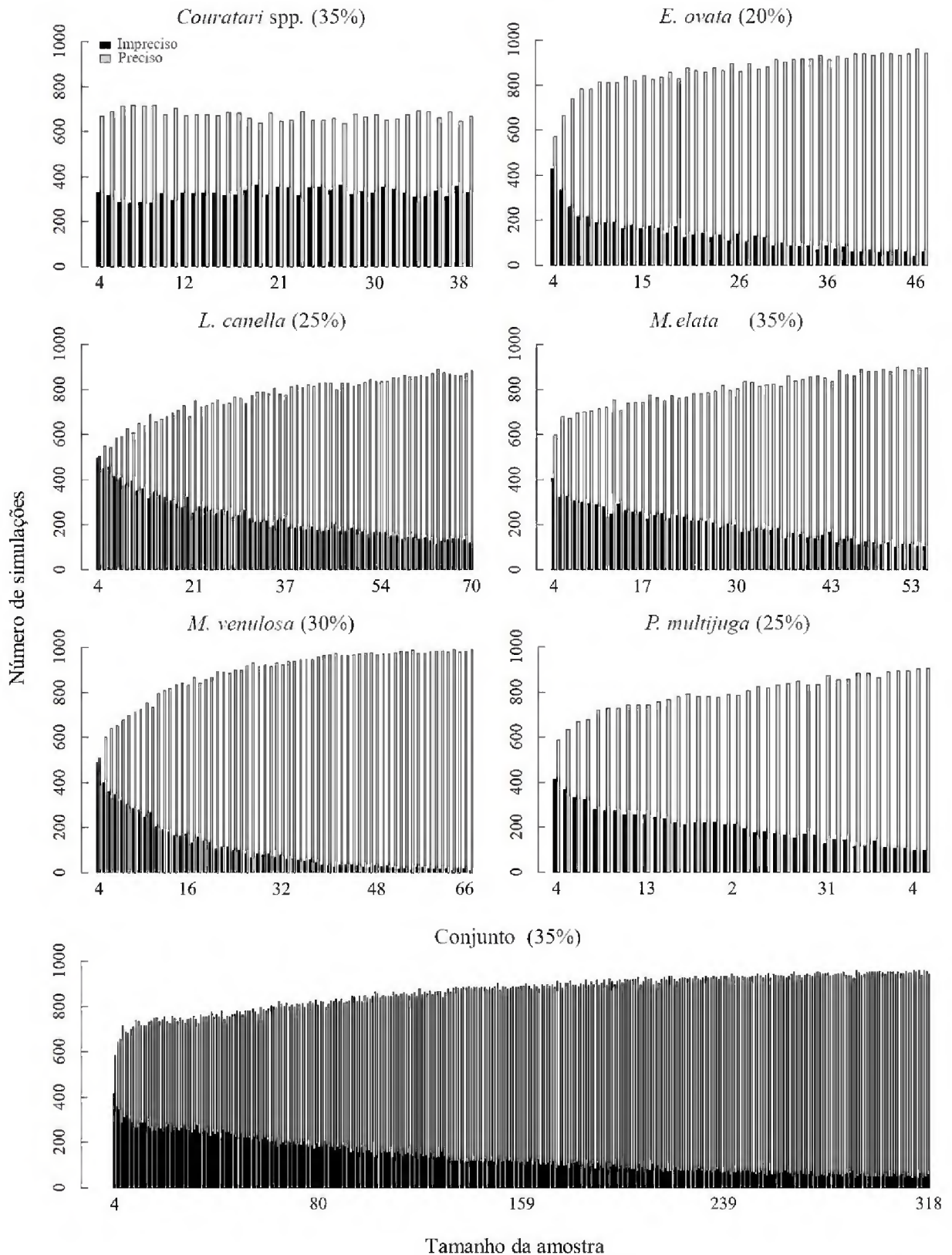


Figura 10. Comparação entre o número de ajustes simulados que apresentaram a precisão requerida (cinza) e o número de ajustes simulados, que não apresentaram a precisão requerida (preto), após o ajuste do modelo de simples entrada, no município de Novo Repartimento, Pará. Ente parênteses encontram-se o LEa% para cada espécie e para o conjunto das espécies.

3.4 Discussão

A curva da média do IC%, para o modelo volumétrico de dupla e simples entrada diminuiu gradativamente com o aumento do tamanho de árvores-amostra analisadas. Sullivan et al. (2018) ao avaliar o número mínimo de árvores-amostra necessário para estimar a altura de árvores das florestas tropicais da América do Sul e Ásia, também revelou um aumento da precisão na estimação da variável na forma exponencial decrescente conforme o aumento do número de árvores-amostra. O mesmo foi relatado por Chave et al. (2004) em uma floresta tropical no Panamá.

Poucas amostras podem não representar o universo amostral, por tanto, quanto maior o número de unidades amostrais maior é a probabilidade de que novas amostras (árvores), tomadas do mesmo universo amostral, conduzam às mesmas respostas (Brooks e Barcowski 2012). O número de árvores-amostra é muito importante, pois está diretamente relacionado à quantidade de trabalho e o custo de um levantamento em campo. Portanto, a avaliação da suficiência amostral é uma temática interessante para o manejo florestal (Maxwell et al. 2008).

Se for somado o número mínimo de árvores-amostra estimado para cada espécie neste estudo, tanto para o modelo de dupla (158 árvores), quanto para o modelo de simples entrada (212 árvores), a quantidade de amostras vai ser bem maior do que o mínimo encontrado para todas as espécies juntas (81 e 158 árvores, respectivamente) (Tabela 6, 7). Sendo assim, para estimar o volume de florestas nativas, o ajuste de equações volumétricas individuais para cada espécie passa a ser muito onerosa, pois além de precisar cubar muito mais árvores, encontrar a quantidade mínima de árvores-amostra para cada espécie no campo aumentaria o tempo e consequentemente os custos do levantamento, não compensando economicamente para o empreendedor florestal.

Sobre os limite de erro amostral, no Brasil, a Norma de Execução nº 01 de 24 de abril de 2007, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), estabelece que para o inventário florestal amostral de árvores comerciais, as médias estimadas para abundância, área basal e volume, não ultrapassem o limite de erro máximo de 10% em torno da média amostral a 95% de probabilidade de certeza (Brasil 2007). No entanto, vale ressaltar que cálculo do erro de amostragem para o inventário florestal amostral, está baseado principalmente na variância do volume das árvores entre as parcelas levantadas, assim como relatado por Leão et al. (2018). Diferentemente do atual estudo, onde a estatística de precisão (erro padrão da estimativa) é adotada como comparador entre os

ajustes dos modelos simulados a partir de uma amostra de tamanho n , e o limite de erro admissível para o mesmo tamanho da amostra.

No geral, nossos resultados mostraram que o IC% está longe de chegar a um LEa% menor que 10%, ou seja, seria necessária uma amostra maior do que aquelas utilizada neste estudo para garantir um ajuste de equação volumétrica com uma precisão aceitável. Para garantir um modelo volumétrico preciso, a cubagem rigorosa deve ser realizada na área que abrange o inventário florestal, visto que, os indivíduos que a compõe, são os que melhor representam suas características e variações de forma e tamanho do fuste (Barreto et al. 2014). Uma vez atendida essas exigências, obter uma amostra consideravelmente grande para atingir um LEa% menor que 10%, pode ser exagerado e não adequado para fins de previsão volumétrica, já que o foco deve estar diretamente ligado no efeito do ajuste em um menor período de tempo com um menor custo. Entretanto o número mínimo de amostras deve ser determinado de forma robusta, para gerar modelos volumétricos ajustados com precisão, ao ponto de não influenciar negativamente no alcance dos objetivos do manejo, ou seja, o planejado deve ser executado. (Maxwell et al. 2008; Knofczynski e Mundfrom 2008).

Considerando toda a população de árvores derrubadas na UPA do presente estudo (11.230 árvores) e se todas estas árvores fossem cubadas para realizar o ajuste dos modelos volumétricos, com o objetivo de atender sem risco a precisão requerida para um LEa% de 10%, seriam necessários pelo menos 450 dias para a realização da cubagem rigorosa, considerando a mensuração aproximada de 25 árvores por dia, conforme citada por Buza et al. (2006). Se for considerado um LEa% de 20% para a o ajuste da equação de dupla entrada, seriam necessários cubar apenas 81 árvores (98% dos modelos precisos) e ao ser menos rigoroso, e considerar um LEa% de 35% para o ajuste da equação de simples entrada, seriam necessários cubar apenas 158 árvores (87% dos modelos precisos). Isso diminuiria drasticamente o tempo e o custo do levantamento (quatro dias para o ajuste de equações de dupla e sete dias para equações de simples entrada), quando comparado com a cubagem do total de árvores abatidas citadas no exemplo acima (11.230 árvores).

É importante considerar que, além da determinação do LEa% a precisão dos ajustes volumétricos também pode ser afetada pela composição das amostras (Knofczynski e Mundfrom, 2008). O senso comum sugere que a composição da amostra utilizada para o ajuste do modelo volumétrico deve levar em consideração a representatividade das espécies e a representatividade do intervalo de classe diamétrica das árvores selecionadas para o corte (Ward 2015). No entanto, vale ressaltar que, garantir a representatividade numérica de algumas espécies arbóreas é um problema nas florestas tropicais, uma vez que algumas

espécies podem apresentar poucos indivíduos na área destinada para o manejo florestal pleno (Akindele e Lemay, 2006), como as espécies raras (menor que quatro indivíduos por 100 ha) de interesse comercial (Brasil 2009), e as hiper-raras (TOVO et al. 2017), que não podem ser exploradas, mas podem ser valiosas.

As 1000 simulações repetidas para tamanhos de amostra diferentes, como utilizado no presente estudo, minimizou o efeito da composição de amostras no ajuste de modelos de regressão (Ward 2015). Tendo em vista a representatividade das espécies e o intervalo de classe diamétrica das árvores selecionadas para o corte, fatores estes que afetam a relação volumétrica, a composição e o tamanho da amostra, que devem ser determinados de forma criteriosa, de modo a evitar estimativas muito distorcidas em situações específicas (Maxwell et al. 2008).

A rigorosidade de 10% de LEa% para cada espécie, acarretaria num número muito elevado de árvores-amostra, se tornando um problema, uma vez que, a maioria das espécies de valor comercial possuem poucos indivíduos na natureza (Akindele e Lemay 2006). O número mínimo de árvores-amostras por espécie foi variado, tanto para equação de dupla, quanto para equação de simples entrada. Este fato pode ser explicado pela heterogeneidade do volume das árvores dentro da espécie, podendo ser influenciadas por diversos fatores, como: as condições do ambiente competitivo (Forrester et al. 2017; Lansanova et al. 2018), as condições distintas do solo e ou topografia, (Detto et al. 2013). Entretanto, utilizando um LEa% de 20% para o ajuste do modelo volumétrico de dupla entrada, foi possível determinar um valor mínimo único de 29 árvores-amostra por espécie. E para garantir um ajuste preciso das equações de simples entrada o mínimo de 39 árvores amostras seriam necessários para um LEa% menos rigoroso de 35%.

O modelo de dupla entrada gerou resultados mais consistente para estimar o volume de árvores em pé por espécie e para o conjunto das espécies. Esse resultado já era esperado, uma vez que quanto maior for o número de variável independente, maior vai ser a precisão da estimativa, desde que essas variáveis independentes não apresentem multicolinearidade (Knofczynski e Mundfrom 2008). Porém, a equação volumétrica de dupla entrada utiliza como variável independente a altura do fuste das árvores, que é medida por meio de instrumentos óticos ou estimada de forma empírica pelo mensurador, tornando o trabalho de campo mais demorado e oneroso, principalmente se as copas das árvores não apresentarem fácil visibilidade, o que pode resultar em erros de estimativa da altura (Berger et al. 2012).

Quando a variável altura do fuste é incorporada em um modelo volumétrico, seus erros de mensuração afetam consideravelmente as estimativas do volume das árvores dando

margens para a lei da propagação de erros (Berger et al. 2013). Fato este, que pode trazer consequências para a estimativa volumétrica da próxima safra, podendo afetar o planejamento da próxima UPA. Outro fator determinante é o tempo perdido durante mensuração da variável altura do fuste em campo com o auxílio de um hipsômetro, que pode chegar a 15 minutos por árvore inventariada, isso ocorre devido a dificuldade de se visualizar as copas das árvores no dossel florestal (Ferreira et al. 2011).

No geral vale ressaltar que, para definir o número mínimo de árvores-amostra em uma unidade de manejo florestal sustentável, além da escolha do modelo volumétrico (simples ou dupla entrada) e da definição do limite de erro amostral, também é importante levantar dados acima do mínimo encontrado neste estudo, para posteriormente testar e validar os modelos volumétricos ajustados. Adicionalmente, é importante ressaltar que o conjunto de árvores-amostra, tanto para o ajuste dos modelos, quanto para a validação dos modelos ajustados, considere a distribuição diamétrica das espécies, afim de contemplar a variabilidade na forma de crescimento das árvores.

3.5 Conclusão

Para uma Floresta Ombrófila Densa destinada ao manejo florestal sustentável, na região do oeste do estado do Pará, para uma amplitude diamétrica de 0,51 m a 1,46 m o número de árvores-amostra mínimo necessário para o ajuste de modelos volumétricos é dependente da equação utilizada e do limite de erro amostral admissível. Sendo assim, o uso do modelo de dupla entrada proposto por Schumacher e Hall, considerando um limite de erro amostral menor que 20%, foi possível determinar o mínimo de 29 árvores-amostra para cada espécie se consideradas individualmente, e o mínimo de 81 árvores-amostra para o conjunto das espécies. Todavia, foi possível determinar o número mínimo para o ajuste de modelos de simples entrada a um limite de erro de 35%, sendo de 39 árvores-amostra para cada espécie e de 158 árvores-amostra para o conjunto das espécies.

Os resultados apresentados neste estudo mostram a necessidade de se considerar com mais seriedade a questão do número de árvores-amostra para predição volumétrica nas florestas da Amazônia brasileira. Existe um perigo potencial ao se propor um tamanho de árvores-amostra inadequado, mas também não se deve ignorar o efeito negativo no tempo e custo para a elaboração de uma equação volumétrica. Estudos adicionais sobre esse assunto, que busque determinar o equilíbrio entre o número de árvores-amostras e custo seguido do tempo do levantamento das árvores-amostra, poderiam ampliar os resultados desta pesquisa.

3.6 Referências Bibliográficas

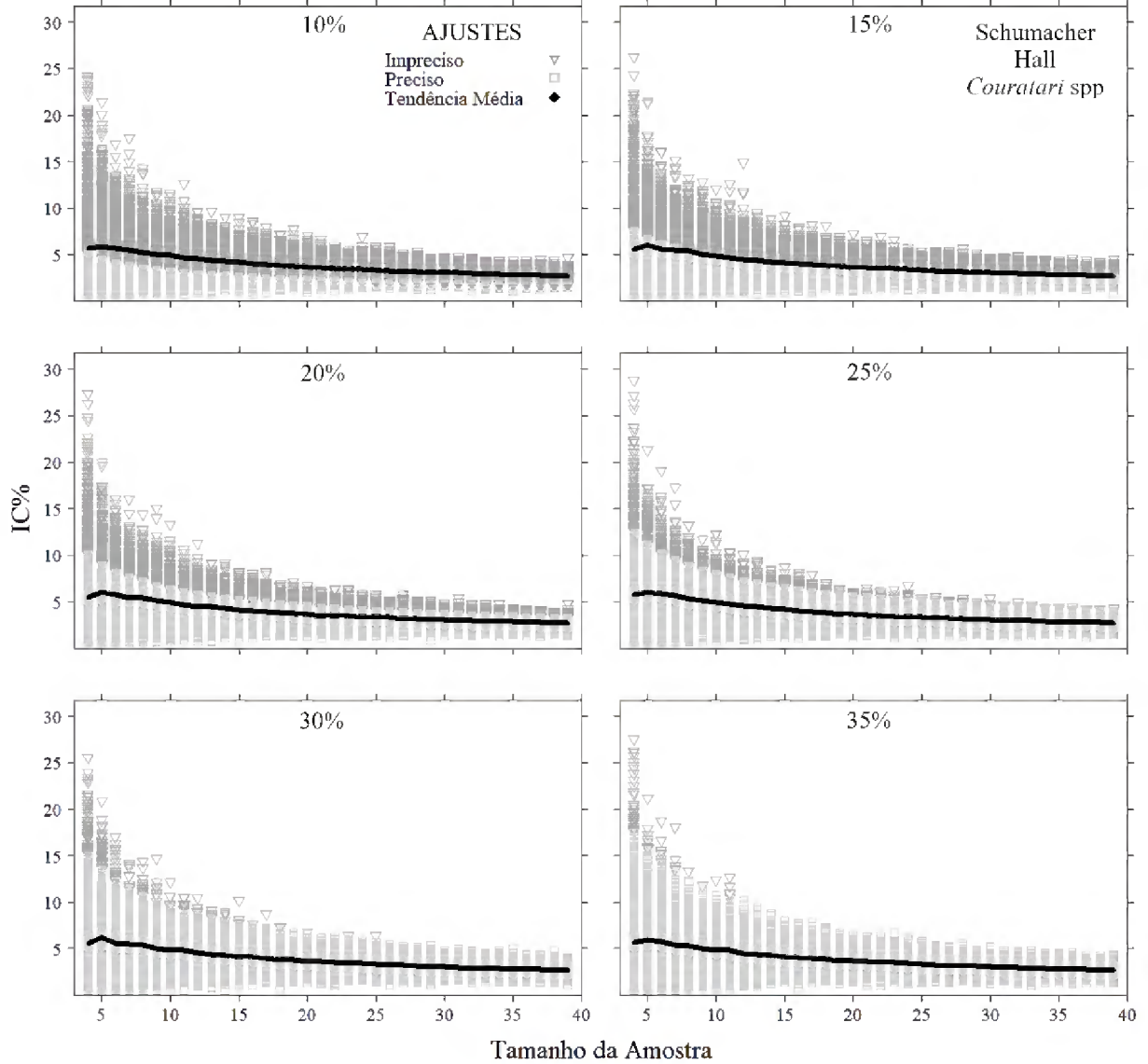
- Akindele, S.O. and LeMay, V.M. 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecology and Management* 226: 41-48.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; de Moraes, G.; Leonardo, J.; Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711-728.
- Barreto, W.F.; Leão, F.M.; de Menezes, M.C.; Souza, D.V. 2014. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. *Pesquisa Florestal Brasileira* 34: 321-329.
- Berger, A.; Gschwantner, T.; Gabler, K.; Schadauer, K. 2012. Analysis of tree measurement errors in the Austrian National Forest Inventory. *Austrian Journal of Forest Science* 129: 149-177.
- Berger, A.; Gschwantner, T.; McRoberts, R.E.; Schadauer, K. 2013. Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. *Forest Science* 60: 14-24.
- Brasil. 2006. Instrução Normativa n.º 5 de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. *Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, treze de dezembro de 2006. (<http://www.sbs.org.br/>). Accessed on 27 fev. 2018.
- Brasil 2007. Norma de Execução n.º 1, de 24 de abril de 2007. Altera as normas técnicas para o manejo florestal na Amazônia. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, dois de maio de 2007. (<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=91545>). Accessed on 7 dez. 2018.
- Brasil 2009. Resolução Conama n.º 406, de 02 de fevereiro de 2009. (www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=597). Accessed on 19/01/2018.
- IBGE. 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da extração vegetal e da silvicultura*. (http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2015_v30.pdf). Accessed on 19/01/2018.
- Brown, M.L. and Murphy, B.R. 1996. Management: Briefs Selection of a Minimum Sample Size for Application of the Regression-Line-Percentile Technique. *North American Journal of Fisheries Management* 16: 427-432.
- Brooks, G.P. and Barcikowski, R.S. 2012. The PEAR method for sample sizes in multiple linear regression. *Multiple Linear Regression Viewpoints* 38: 1-16.
- Buza, A.G.; Tourinho, M.M.; Silva, J.N. 2006. Caracterização da colheita florestal em Cabinda, Angola. *Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 45: 59-78.

- Chave, J.; Condit, R.; Aguilar, S.; Hernandez, A.; Lao, S.; Perez, R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 359: 409-420.
- Detto, M.; Muller Landau, H.C.; Mascaró, J.; Asner, G.P. 2013. Hydrological networks and associated topographic variation as templates for the spatial organization of tropical forest vegetation. *PLoS ONE* 8: e76296.
- Feldpausch, T.R.; Banin, L.; Phillips, O.L.; Baker, T.R.; Lewis, S.L.; Quesada, C.A.; et al. 2010. Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences Discussions* 7: 7727-7793.
- Felfili, J. M.; Eisenlohr, P. V.; Melo, M. M. R. F.; Andrade, L. A.; Meira-Neto, J. A. A. 2011. *Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos*. UFV, Viçosa, 558p.
- Ferreira, J.C.S.; Silva, J.A.A.; Miguel, E.P.; Encinas, J.I.; Tavares, J.A. 2011. Eficiência relativa de modelos volumétricos com e sem a variável altura da árvore. *Acta tecnológica*, 6: 89-102.
- Figueiredo-Filho, A.; Machado, S.A.; Miranda, R.O.V.; Retslaff, F.A. S. *Compêndio de equações de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil*. Os autores, Curitiba, 306 p.
- Forrester, D.I.; Benneter, A.; Bouriaud, O.; Bausus, J. 2017. Diversity and competition influence tree allometric relationships – Developing functions for mixed-species forests. *Journal of Ecology* 105: 761–774.
- Francez, L.M.B.; Batista, F.J.; Takehana, C.L.I.; Barros, P.L.C.; Souza, D.V.; Corumbá, W.C.; Ramos, E.M.L. S. 2017. *Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável – PMFS*. Edufra, Belém, 100p.
- Gimenez, B.O.; Danielli, F.E.; Oliveira, C.K.A.; Santos, J; Higuchi, N. 2015. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. *Scientia Forestalis* 43: 291-301.
- Guimarães, D.P. and Leite, H.G. 1996. Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis* 50: 37-42.
- Heinsdijk, D. 1958. *Report to the government of Brazil on a forest inventory in the Amazon Valley (region between rio Xingu and rio Tocantins)*. FAO, Rome, 93p.
- Knofczynski, G.T. and Mundfrom, D. 2008. Sample sizes when using multiple linear regression for prediction. *Educational and psychological measurement* 68: 431-442.
- Lansanova, L.R.; Silva, F.A.; Schons, C.T.; Pererira, A.C.D.S. 2018. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. *BIOFIX Scientific Journal* 1: 109-115.
- Leão, F.M.; Dionisio, L.F.S.; Sousa, L.D.C.M.; Menezes, M.C.; Oliveira, M.H.S.; Neves, R.L.P. 2018. Sample intensity in ombrophilous open forest at Verde Para Sempre Extractive Reserve, Porto de Moz, PA. *Revista Agro@ambiente on-line* 12: 68-79.

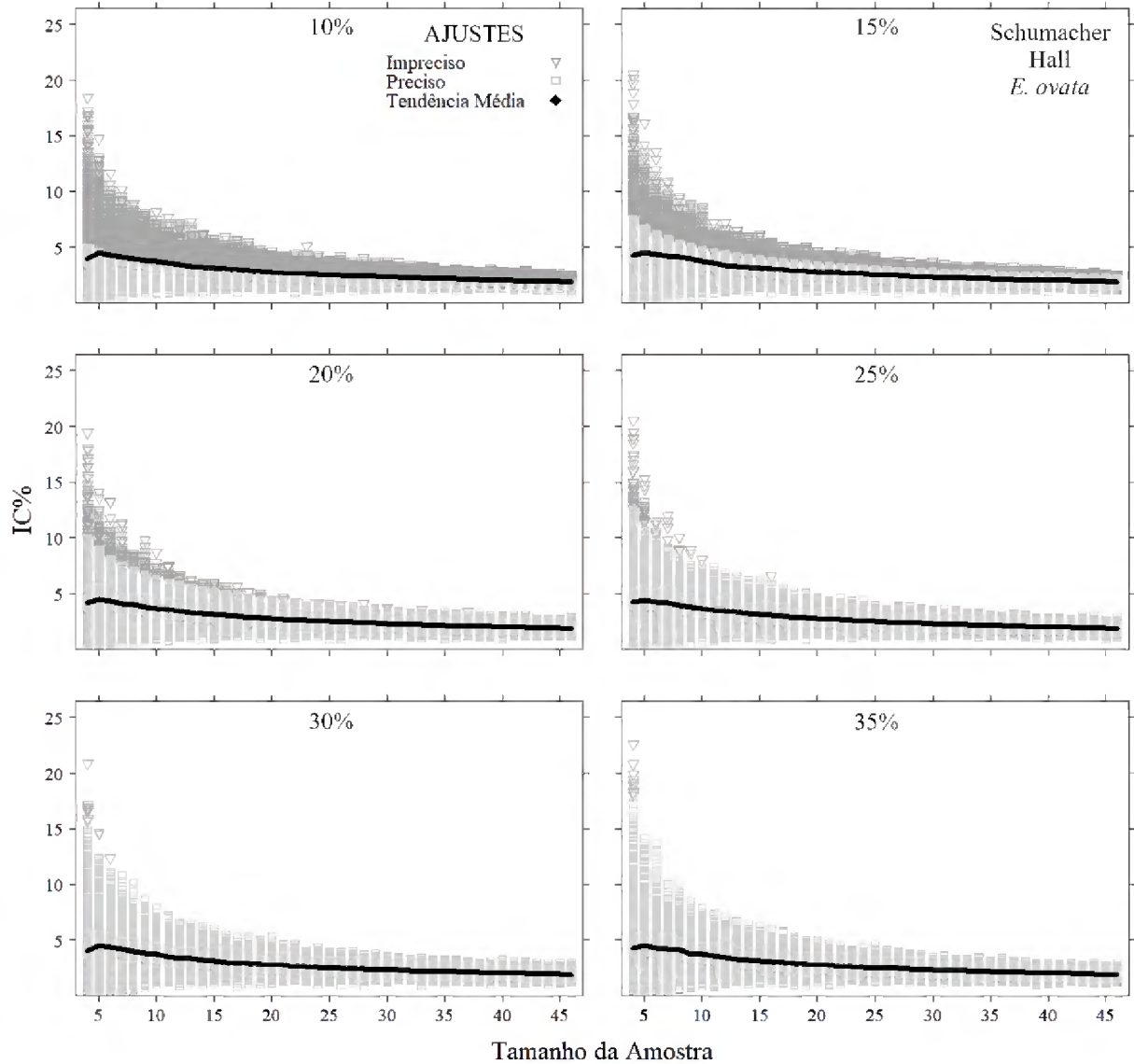
- Masota, A.M.; Zahabu, E.; Malimbwi, R.E.; Bollandasås, O.M.; Eid, T.H. 2014. Volume models for single trees in tropical rainforests in Tanzania. *Journal of Energy and Natural Resources*. 3: 66-76.
- Maxwell, S.E.; Kelley, K.; Rausch, J.R. 2008. Sample size planning for statistical power and accuracy in parameter estimation. *Annual review of psychology* 59: 537-563.
- 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: 107-114.
- Saarinen, N.; Kankare, V.; Vastaranta, M.; Luoma, V.; Pyörälä, J.; Tanhuanpää, T.; et al. 2017. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 123: 140-158.
- Sande, M. T.; Peña Claros, M.; Ascarrunz, N.; Arets, E.J.; Licona, J.C.; Toledo, M.; Poorter, L. 2017. Abiotic and biotic drivers of biomass change in a Neotropical forest. *Journal of Ecology* 105: 1223-1234.
- Sarkar, D. and Andrews, F. 2018. *latticeExtra: Extra Graphical Utilities Based on Lattice*. (<http://cran.r-project.org/web/packages/latticeExtra/index.html>). Accessed on 10/10/2018.
- SFB. 2018. Serviço Florestal Brasileiro. *Inventário florestal nacional Santa Catarina, principais resultados* (<http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/3656-relatorio-ifn-sc-2017/file>). Accessed on 10/10/2018.
- SEFA-PA. 2017. Secretaria de Fazenda do estado do Pará. *Boletim de preços mínimos demercado - madeira* (http://sefa.pa.gov.br/legislacao/interna/portaria/ps2005_00354an0.pdf). Accessed on 10/10/2018.
- Sullivan, M.J.P.; Lewis, S.L.; Hubau, W.; Qie, L.; Baker, T.R.; Banin, L.F.; et al. 2018. Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 9: 1179-1189.
- Ter-Steege, H.; Vaessen, R.W.; Cárdenas López, D.; Sabatier, D.; Antonelli, A.; Oliveira, S.M.; et al. 2016. The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)* 6: 1-15.
- Tibshirani, R.J. and Efron, B. 1993. An introduction to the bootstrap. *Monographs on statistics and applied probability* 57: 1-436.
- Tovo, A.; Suweis, S.; Formentin, M.; Favretti, M.; Volkov, I., Banavar, J. R.; et al. 2017. Upscaling species richness and abundances in tropical forests. *Science Advances*, 3: e1701438.
- Ward, P.J. 2015. Prediction intervals: Placing real bounds on regression-based allometric estimates of biomass. *Biometrical Journal*, 57: 695-711.

Apêndice 2

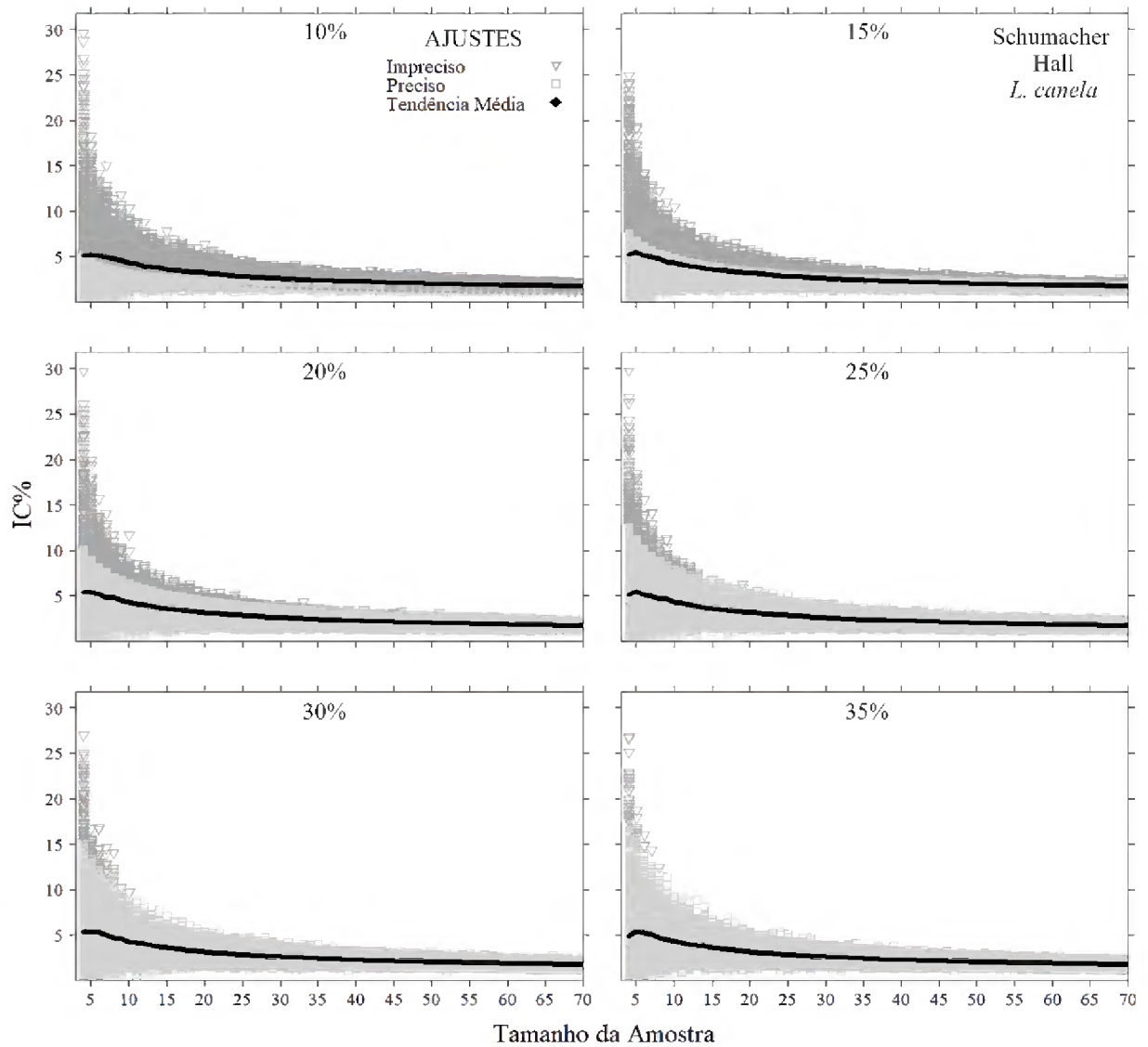
– Gráficos da tendência média do IC% obtido pelo ajuste do modelo volumétrico de dupla entrada proposto por Schumacher e Hall



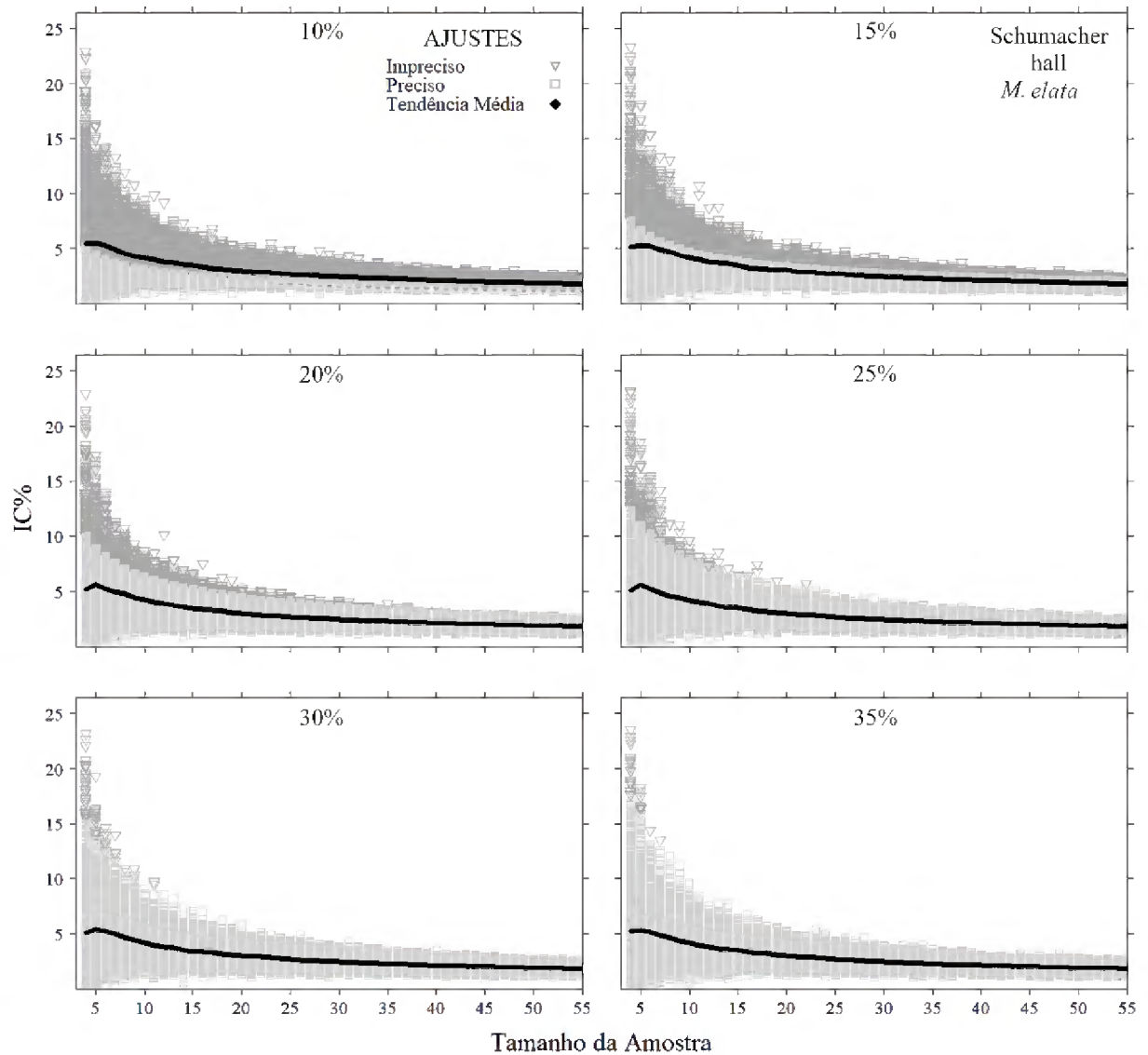
Apêndice 2 - Figura 1: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível ($LEa\% = 10, 15, 20, 25, 30, 35\%$), para o ajuste do modelo de dupla entrada para espécie *Couratari* spp.



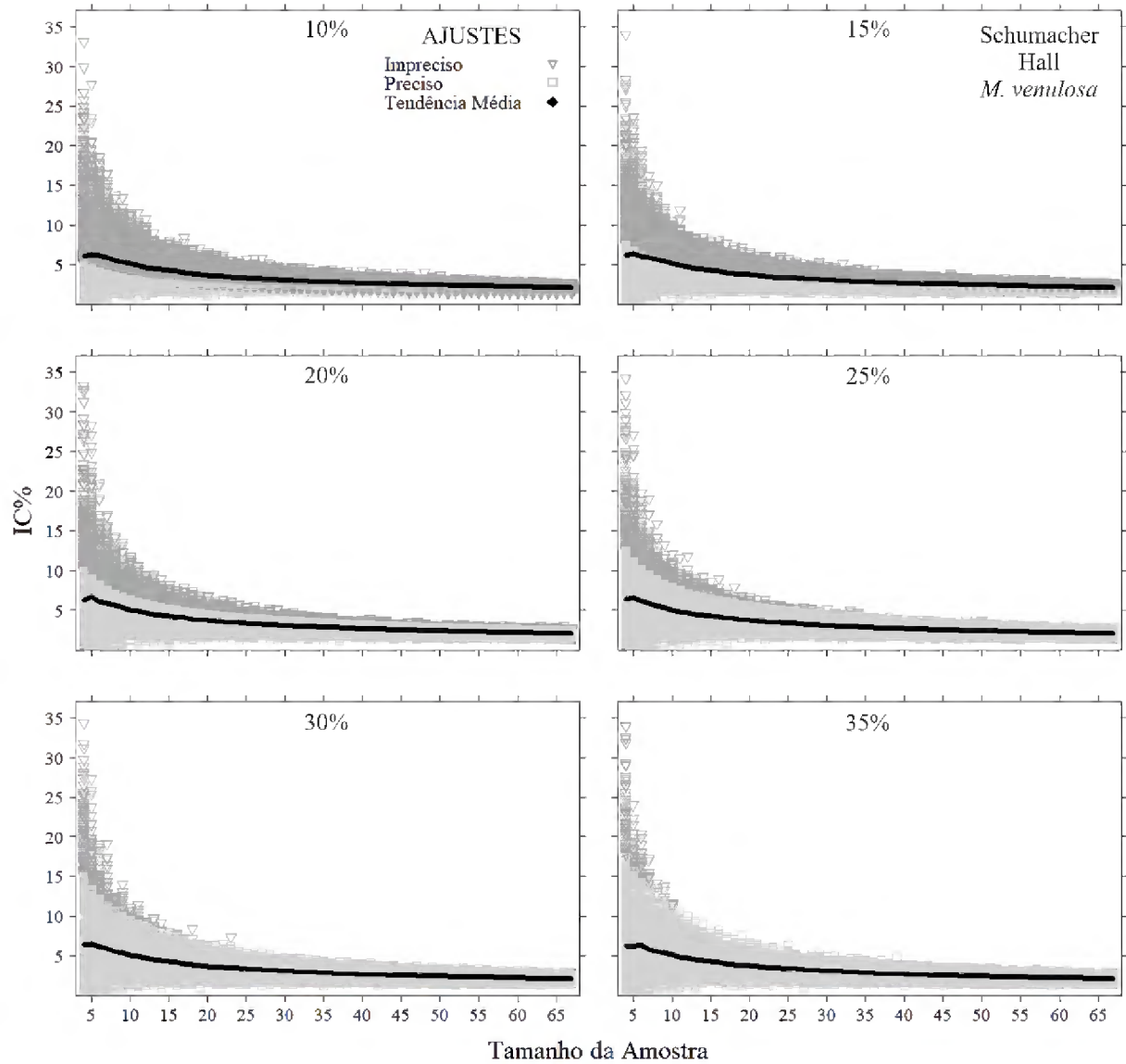
Apêndice 2 - Figura 2: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de dupla entrada para espécie *E. ovata*



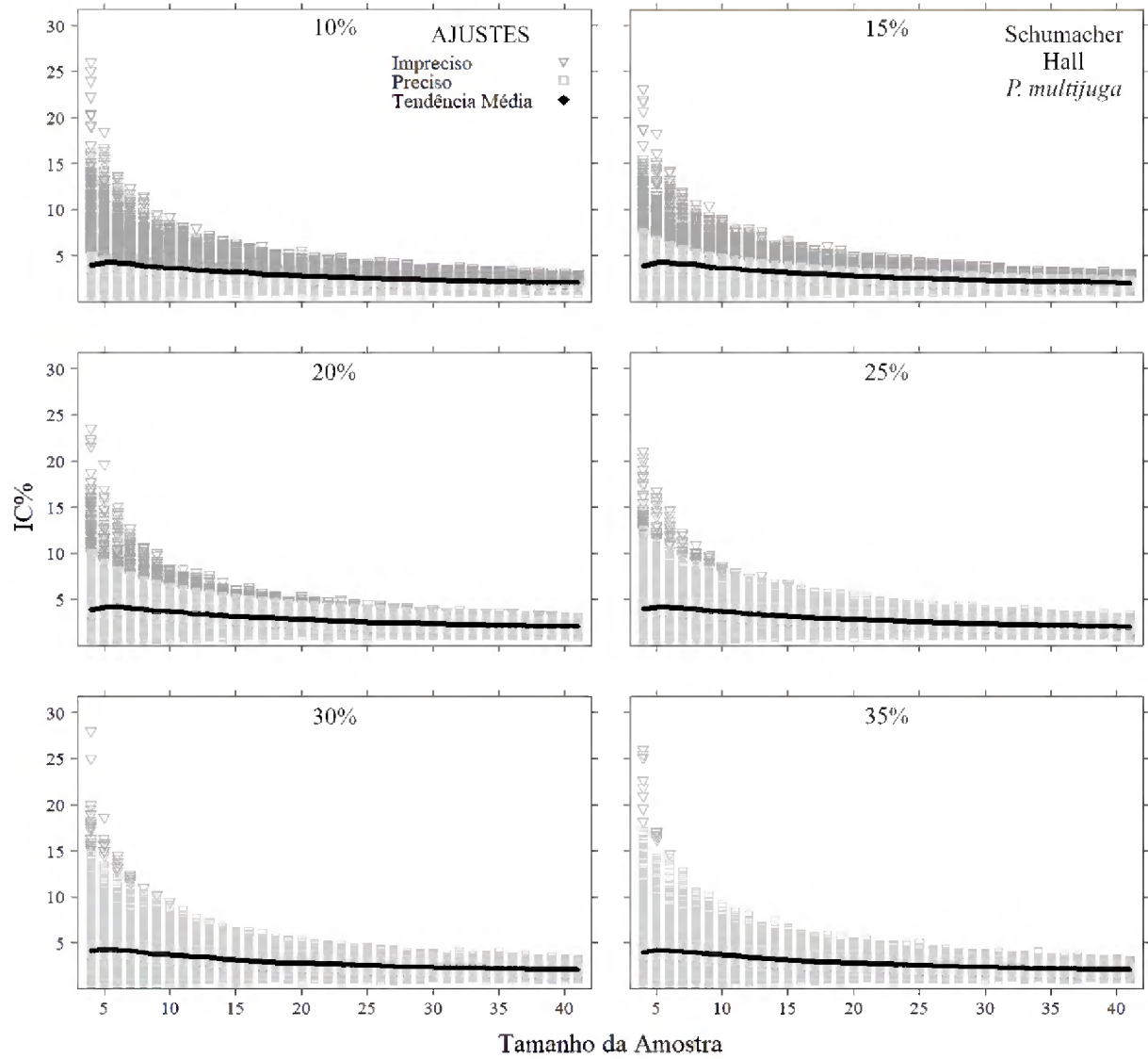
Apêndice 2 - Figura 3: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de dupla entrada para espécie *L. canella*.



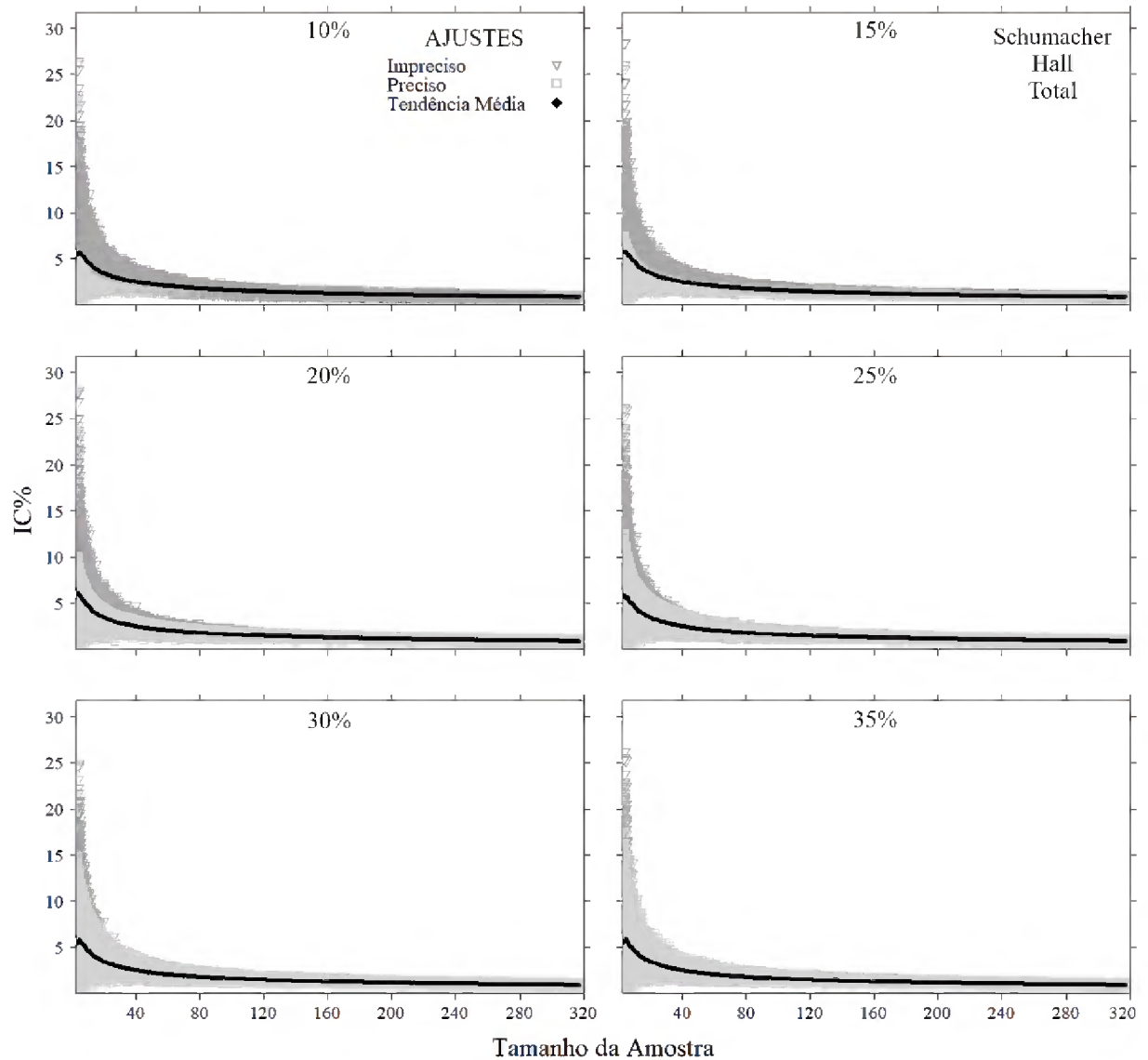
Apêndice 2 - Figura 4: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de dupla entrada para espécie *M. elata*.



Apêndice 2 - Figura 5: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de dupla entrada para espécie *M. venulosa*.



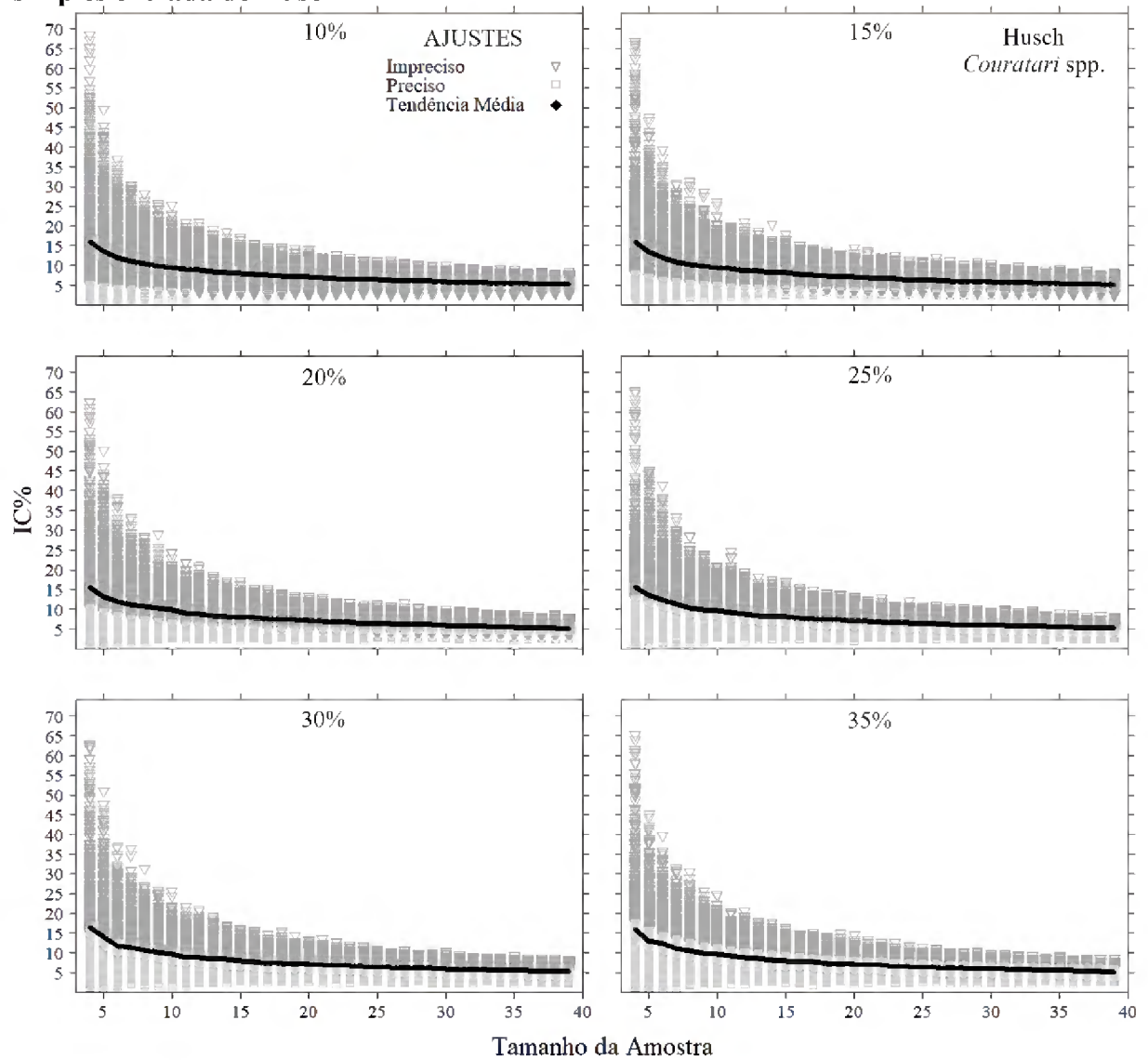
Apêndice 2 - Figura 6: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de dupla entrada para espécie *P. multijuga*.



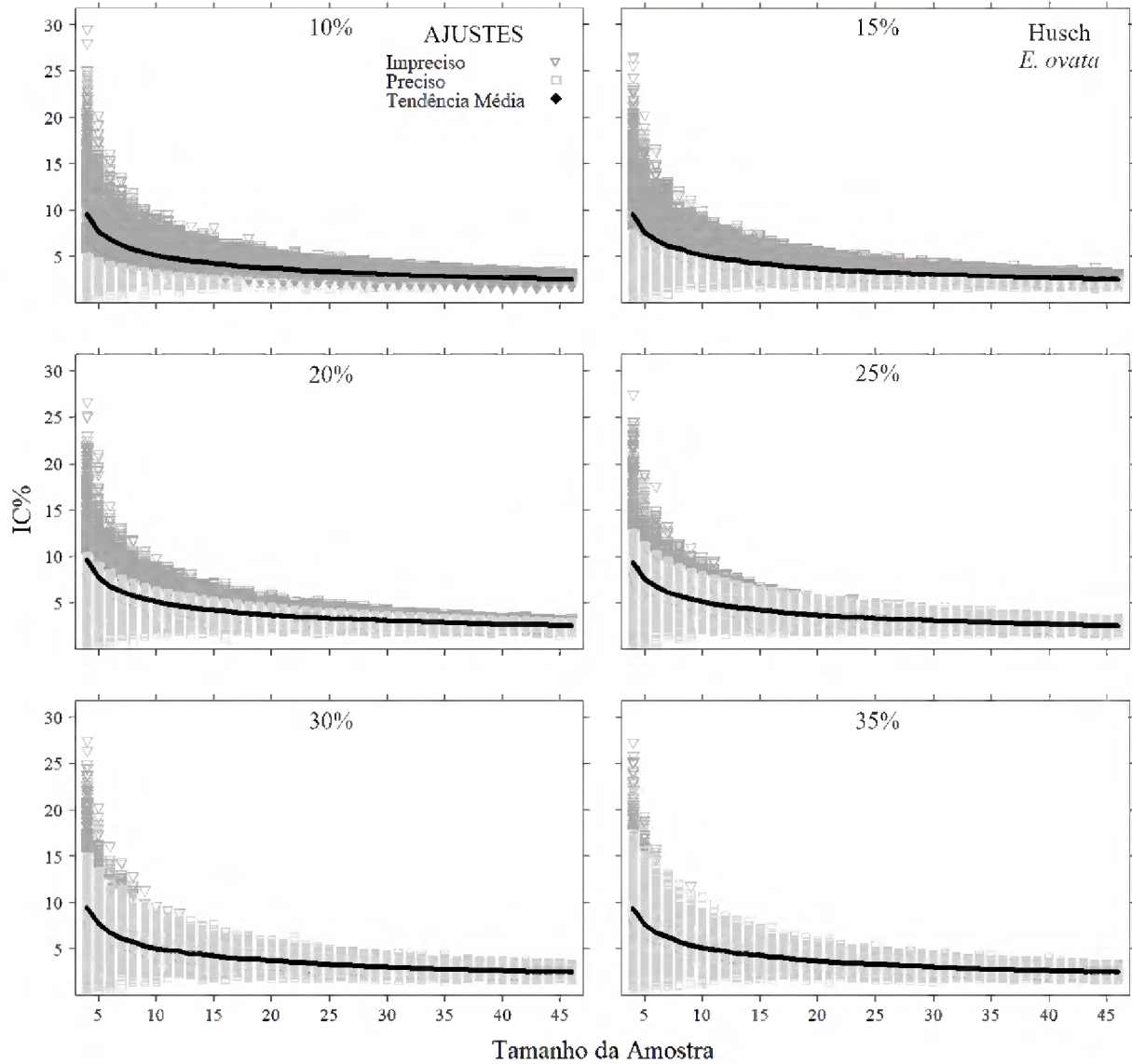
Apêndice 2 - Figura 7: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de dupla entrada para todas as espécies.

Apêndice 3

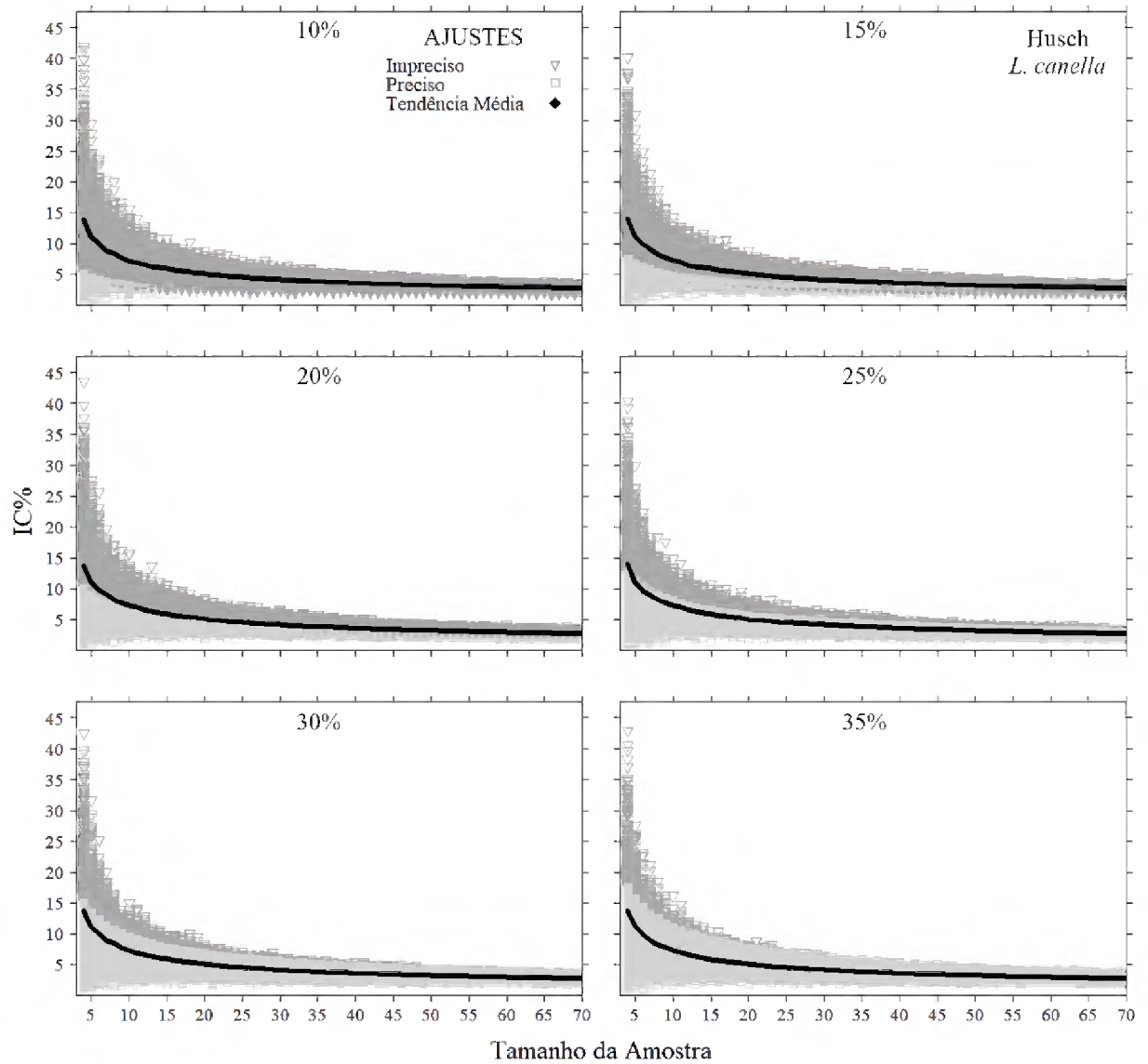
– Gráficos da tendência média do IC% obtido pelo ajuste do modelo volumétrico de simples entrada de Husch



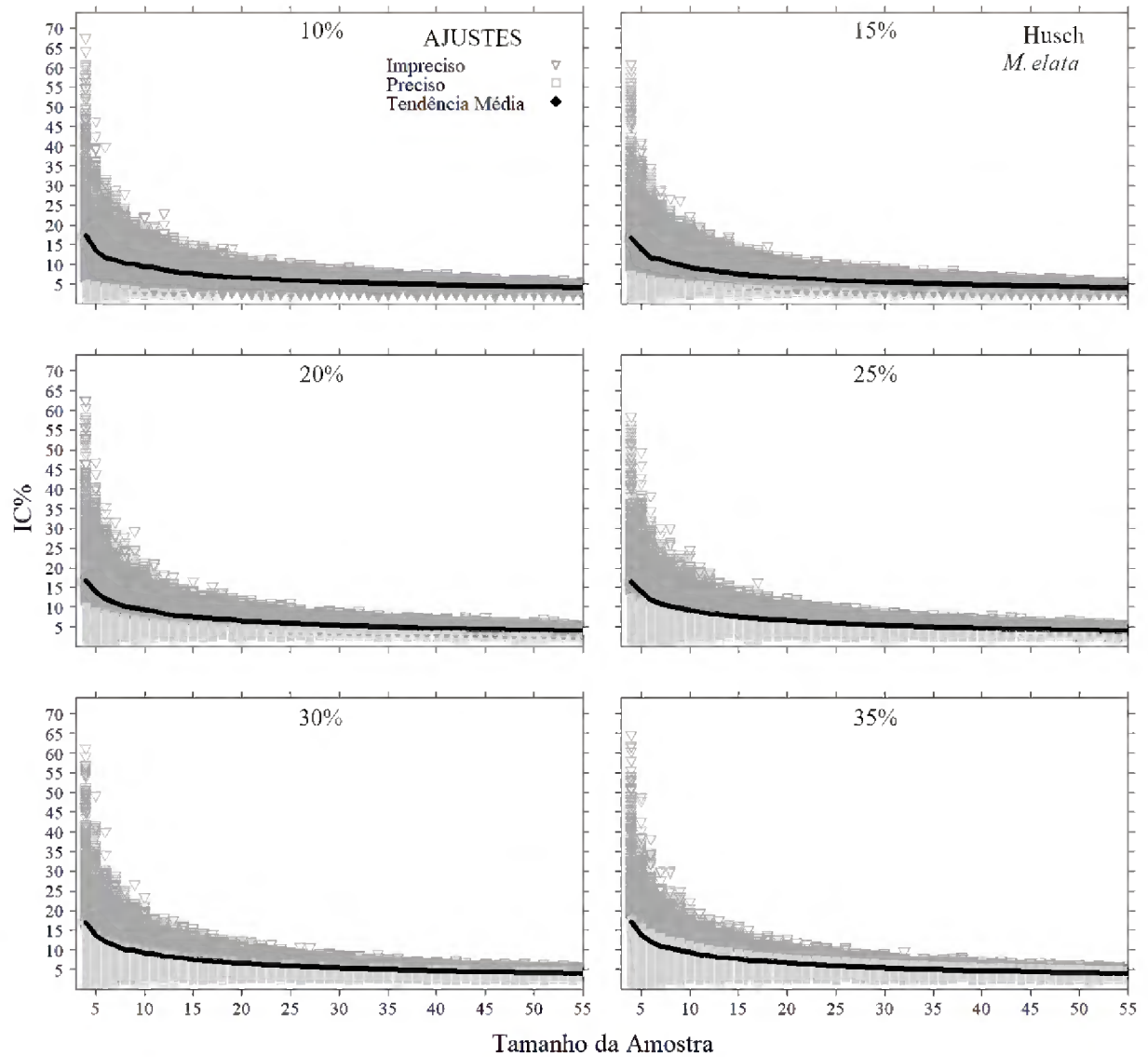
Apêndice 3 - Figura 1: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de simples entrada para espécie *Couratari* spp.



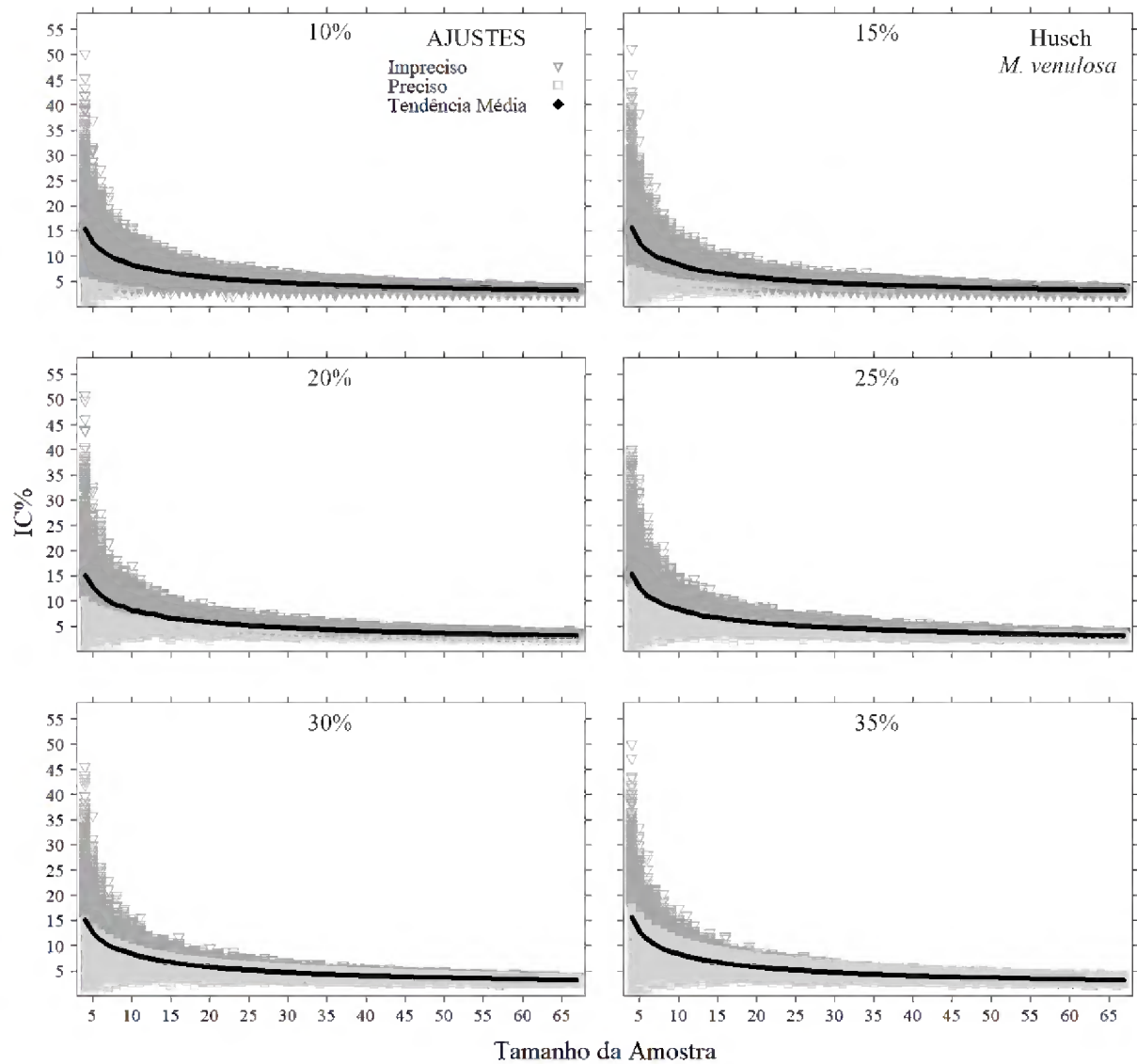
Apêndice 3 - Figura 2: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível ($LEa\% = 10, 15, 20, 25, 30, 35\%$), para o ajuste do modelo de simples entrada para espécie *E. ovata*.



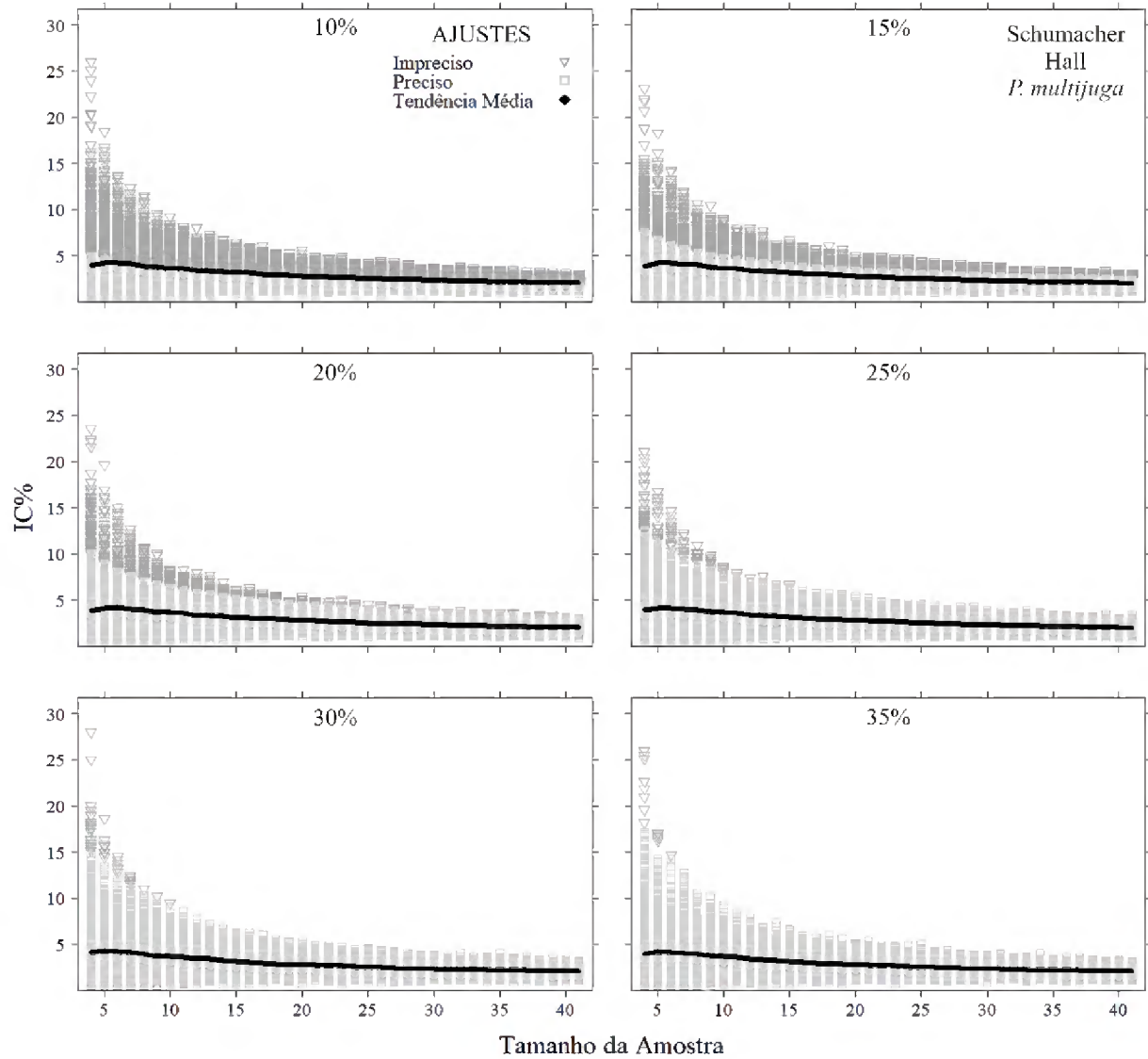
Apêndice 3 - Figura 3: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de simples entrada para espécie *L. canella*.



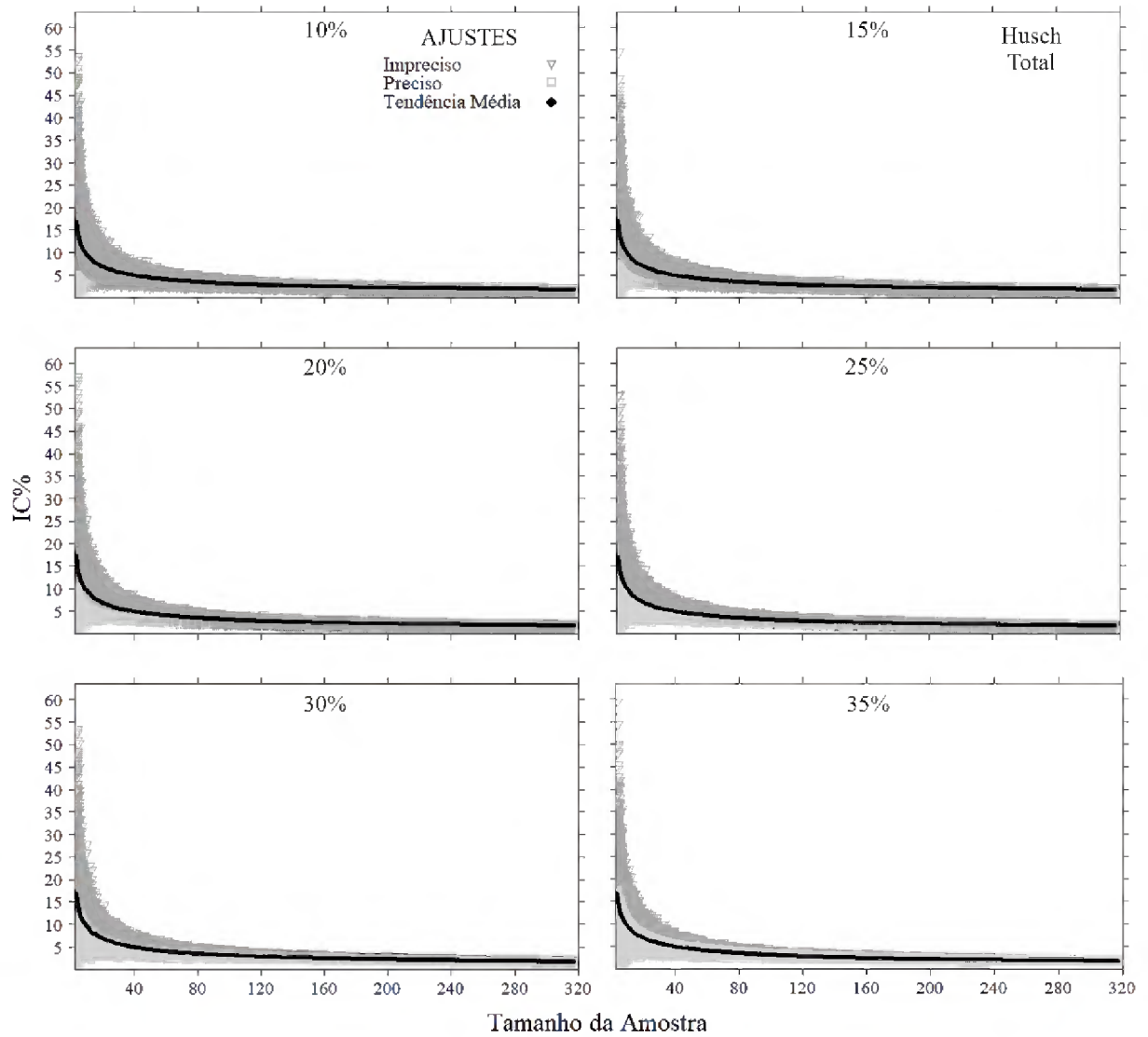
Apêndice 3 - Figura 4: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de simples entrada para espécie *M. elata*.



Apêndice 3 - Figura 5: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de simples entrada para espécie *M. venulosa*.



Apêndice 3 - Figura 6: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível (LEa% = 10, 15, 20, 25, 30, 35%), para o ajuste do modelo de simples entrada para espécie *P. multijuga*.



Apêndice 3 - Figura 7: Tendência média do índice de confiabilidade (IC%), em função do tamanho da amostra, nos diferentes limites de erro admissível ($LEa\% = 10, 15, 20, 25, 30, 35\%$), para o ajuste do modelo de dupla entrada para todas as espécies.

4 ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA PARA ÁRVORES EM PÉ: QUAL O MELHOR MÉTODO?³

Resumo

O objetivo foi comparar a precisão volumétrica de árvores das diferentes formas de modelagem (fator de forma 0,7, fator de forma médio, regressão linear de simples e dupla entrada e RNA's de simples e dupla entrada) nos diferentes tamanhos de árvores-amostra. A pesquisa ocorreu numa floresta ombrófila densa localizada no município de Novo Repartimento-PA. Foram cubadas rigorosamente pelo método de Smalian 681 árvores-amostra, pertencentes a 52 espécies. Para comparar a precisão e exatidão volumétrica dos métodos de modelagem nos diferentes tamanhos de árvores-amostra, foram separados 100 árvores-amostra, que não fizeram parte da modelagem volumétrica, para validação dos modelos ajustados. Das 581 árvores-amostra, foram selecionadas árvores de forma aleatória para compor os diferentes tamanhos de amostra (25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300) para cada método de modelagem. Para análise da precisão dos modelos foi calculado o erro padrão da estimativa, o critério de informação Bayesiano e o teste F de Graybill. Foram selecionados os modelos com os menores valores dos parâmetros de precisão. Para a verificara a exatidão os volumes estimados pelos modelos testados para os diferentes tamanhos de árvores amostra, foi realizado a ANOVA fatorial (7 x 8). Os modelos que apresentaram melhor qualidade de ajuste e termos de precisão e exatidão foram Schumacher e Hall, ajustados a partir de 75 árvores-amostra, Husch, a partir de 150 árvores-amostra e as RNA's de dupla entrada, a partir 100 árvores amostra. O modelo de Husch, a partir de 150 árvores-amostra é a alternativa mais prática para a estimativa volumétrica.

Palavras-Chave: Volume de madeira; Modelagem; Precisão e Exatidão; Manejo Florestal.

³ Este artigo segue as normas do periódico Scientia Forestalis

VOLUMETRIC ESTIMATION FOR TREES: WHAT IS THE BEST METHOD?

Abstract

The aim was to compare tree volumetric precision estimated in different forms of modeling (form factor 0.7, mean shape factor, linear regression using single and double entry and RNA using single and double entry) for different sizes of trees. The research was carried out in a dense ombrophilous forest located in the municipality of Novo Repartimento-PA. Sixty-one sample-trees belonging to 52 species were measured using the Smalian method for the real volume. To compare the precision and volumetric accuracy of the modeling methods for the different sizes of trees, 100 sample-trees, which were not part of the volumetric modeling, were separated for validation of the adjusted models. From the 581 sample-trees, some were selected randomly to compose the different sample sizes (25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300) for each modeling method. The precision of the models was analyzed by the standard error of the estimate, the Bayesian information criterion and the Graybill F test. The models with the lowest values in the precision parameters were selected. To verify the accuracy of the volumes estimated by the models for the different sizes of trees, the factorial ANOVA (7 x 8) was performed. The models that presented the best quality of fit and terms of precision and accuracy were Schumacher-Hall adjusted from 75 sample-trees; Husch from 150 sample-trees and the double-entry RNA from 100 sample-trees. The Husch model adjusted from 150 sample-trees is the most practical alternative for volumetric estimation.

Keywords: Wood volume; Modeling; Precision and Accuracy; Forest management

4.1 Introdução

O Brasil é um país florestal, que possui aproximadamente 485 milhões de hectares de florestas nativas, sendo que aproximadamente 342 milhões de hectares pertencem a floresta Amazônica (SNIF, 2017). 52% dessa floresta são considerados efetivamente disponíveis para a iniciativa privada, o que torna a Amazônia atrativa aos olhos do setor florestal (SNIF, 2016), especialmente para comercialização de produtos madeireiros. No estado do Pará, esse setor madeireiro levanta cerca de 400 milhões de dólares por ano em toras, sendo o maior produtor de madeira originada das florestas nativas brasileiras (SEFA, 2017).

Para o setor de produtos florestais madeireiro o volume das toras de árvores é a informação quantitativa mais importante para o planejamento e a execução dos planos de manejo florestal sustentáveis na Amazônia. Por isso, uma boa estimativa dos volumes das árvores é primordial para a avaliação do estoque de madeira e do potencial produtivo da floresta (RIBEIRO et al., 2014). No Brasil, a equação do cilindro multiplicado pelo fator de forma 0,7 (HEINSDIJK, 1958) foi muito utilizada para a estimativa do volume de madeira do fuste de árvores em pé, mas nos dias atuais a utilização desse método só é permitida para estimar o volume de árvores no primeiro Plano de Operação Anual (POA). A partir do segundo POA é necessário a existência de uma equação de volume específica para cada Unidade de Manejo florestal (UMF) (BRASIL, 2009).

Muitas equações volumétricas têm sido ajustadas por meio de regressão linear para diferentes áreas de florestas nativas da Amazônia Legal brasileira (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014). Em geral, os modelos matemáticos utilizados para o ajuste apresentam uma variável dependente (volume) e variáveis independentes, como diâmetro a altura do peito (DAP) e altura do fuste das árvores (HIGUCHI; RAMM, 1985; BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009; LANSSANOVA et al., 2018).

Uma outra alternativa para estimar o volume do fuste de árvores em pé está no emprego das Redes Neurais Artificiais (RNA's). Essa ferramenta é baseada na inteligência artificial e utiliza técnicas computacionais fundamentadas nas estruturas neurais de seres humanos, adquirindo conhecimento por meio de treinamentos (AKKOÇ, 2012). Esses neurônios artificiais são modelos matemáticos simplificados dos próprios neurônios biológicos, recebendo as informações de entrada, ponderando pesos sinápticos e gerando respostas únicas como resultado (BRAGA et al., 2007; BINOTI et al. 2014). Estruturalmente, uma RNA está ligada ao algoritmo de aprendizagem utilizado para treinar a rede. A RNA é composta por camadas de neurônios paralelos e conectados entre si, sendo formado por uma

camada de entrada (entrada das variáveis independentes), uma ou mais camadas intermediárias (extração das características) e uma camada de saída, como resultado da RNA (variável dependente) (HAYKIN, 2001).

As RNA's vêm aprimorando técnicas biométricas e de inventário florestal, modelando com maior precisão e exatidão nas estimativas de crescimento e produção florestal (CASTELLANOS et al, 2007; BINOTI et al. 2014). A precisão de uma estimativa é determinada pela distância dos desvios da amostra em relação a média estimada, ou seja, quanto menor for essa distância, mais precisa será a estimativa volumétrica. Já a exatidão de uma estimativa é definida pela distância do valor real, independentemente distância dos desvios da amostra, ou seja, quanto menor a diferença entre a estimativa volumétrica e o valor real verificado posteriormente, maior terá sido a sua precisão (MACHADO, 2014).

Alguns estudos constataram a eficiência da modelagem volumétrica advinda das RNA's em termos de precisão e exatidão quando comparada com a modelagem volumétrica desenvolvida por meio da análise da regressão linear, principalmente em áreas de plantios florestais (BINOTI et al. 2013; CORDEIRO et al. 2015; VENDRUSCOLO et al. 2015; LEAL et al. 2015). Este sucesso ocorre devido as estruturas robustas das RNA's apresentarem uma maior tolerância ao erro da relação entre as variáveis dependentes e independentes, além de possuir a capacidade de resolver sistemas complexos, modelando não somente variáveis quantitativas, mas também variáveis qualitativas (BINOTI, 2013; LACERDA et al. 2017). Além disso, as RNAs podem tolerar um número reduzido de unidades de amostra na sua camada de entrada (DIAMANTOPOULOU; MILIOS, 2010).

A comparação entre o ajuste de modelos volumétricos realizados pela RNA e a regressão linear ainda é escassa nas florestas da Amazônia brasileira, principalmente em termos da influência do tamanho da amostra sobre a qualidade de ajuste dos modelos. Para a floresta amazônica devido a sua grande diversidade de espécies de árvores comerciais, o ideal seria o levantamento de todas as árvores exploradas para garantir uma modelagem volumétrica robusta para os demais POA, pois uma amostra de tamanho inadequado pode propiciar o ajuste de equações menos precisas ou tendenciosas (SULLIVAN et al. 2018). Por outro lado, um número excessivo de árvores-amostra eleva o tempo de trabalho em campo e consequentemente aumentam os custos para as empresas florestais (GUIMARÃES; LEITE 1996).

Diante da importância deste assunto para o setor florestal na Amazônia brasileira e em especial no estado do Pará, esse trabalho visa comparar a precisão volumétrica das diferentes formas de modelagem do volume individual de árvores (fator de forma, regressão

linear e RNA's) tendo em vista diferentes tamanhos de amostra. A hipótese a ser testada é que os diferentes métodos de modelagem do volume individual de árvores para floresta nativa produzem a mesma precisão da estimativa, independentemente do tamanho da amostra utilizado para o ajuste do modelo.

4. 2 Material e Métodos

4. 2. 1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida em uma (UMF) empresarial, com uma área de 78.233,00 ha, localizada no município de Novo Repartimento, Pará (03° 10' 06,4'' S e 51° 17' 55,5'' W). A vegetação é caracterizada como Floresta Ombrófila Densa, o relevo é do tipo plano, sendo na sua maioria levemente ondulado, com predominância de Argissolos vermelho amarelo. O clima é quente e úmido, do tipo Am segundo a classificação de Köppen, com precipitações anuais entre 1.400 mm a 2.100 mm e temperatura média maior que 26 °C e menor que 27.3 °C (ALVARES et al., 2013; IBGE, 2016).

4. 2. 2 Amostragem e cubagem das toras

No ano de 2003 foram explorados em média 19,144 m³.ha⁻¹ de madeira comercial, o que corresponde a 11.230 árvores distribuídas em 72 espécies, localizados na primeira UPA, com área de 2.778 ha, (3,55% da UMF). Após a exploração, foram cubadas 681 árvores-amostra, pertencentes a 52 espécies (Tabela 8). Todas as árvores foram identificadas pelo nome vulgar com auxílio de um identificador botânico com experiência na identificação das espécies da região. As árvores-amostras tiveram dimensões que variaram entre 0,50 e 1,46m de DAP e entre 7,03 e 33,80m de altura do fuste (Tabela 8).

Tabela 8. Número árvores-amostra (N), por espécie, utilizadas para a modelagem volumétrica no município de Novo Repartimento, Pará. Valores médio (med.), mínimo (min.) e máximo (max.) do Diâmetro à altura do peito (DAP) e altura comercial (h_c), ambos medidos em metros (m).

Espécies	N	DAP (m)			h _c (m)		
		Min.	Máx.	Méd.	Min.	Máx.	Méd.
<i>Brosimum parinarioides</i> Ducke	5	0,77	1,00	0,91	12,50	22,00	18,64
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	24	0,59	1,41	0,85	9,00	28,00	16,95
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	7	0,53	1,00	0,74	12,00	22,00	16,75
<i>Hymenolobium heterocarpum</i> Ducke	4	0,57	1,06	0,81	15,40	20,83	18,72
<i>Sterculia pruriens</i> (Aubl.) K. Schum.	1	0,58	0,58	0,58	10,83	12,00	10,83

<i>Trattinnickia glaziovii</i> Swart	1	0,75	0,75	0,75	16,40	16,77	16,40
<i>Tetragastris panamensis</i> (Engl.) Kuntze	6	0,57	1,00	0,77	10,00	22,00	18,10
<i>Tetragastris altissima</i> (Aubl.) Sw.	7	0,57	1,19	0,83	14,00	24,00	20,51
<i>Aspidosperma</i> spp.	2	0,57	0,79	0,68	13,00	30,42	14,50
<i>Anacardium spruceanum</i> Benth. ex Engl.	15	0,55	1,00	0,76	7,64	25,38	15,57
<i>Dimorphandra gardneriana</i> Tulasne	4	0,64	1,00	0,77	16,64	20,40	19,85
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	5	0,62	1,12	0,92	16,60	21,75	18,62
<i>Cedrelinga catenaeformis</i> Ducke	9	0,61	1,18	0,96	11,32	23,13	17,86
<i>Copaifera reticulata</i> Ducke	10	0,61	1,00	0,82	9,80	20,00	18,53
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	6	0,59	1,00	0,85	12,40	18,07	20,20
<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	69	0,58	1,46	0,89	7,03	30,79	16,03
<i>Diclinanona calycina</i> (Diels) R. E. Fr.	1	0,81	0,81	0,81	9,33	15,80	15,80
<i>Vatairea paraensis</i> Ducke	4	0,56	0,77	0,64	16,50	21,13	20,47
<i>Parkia paraensis</i> Ducke	10	0,65	1,19	0,87	8,00	27,84	16,73
<i>Enterolobium maximum</i> Ducke	2	0,72	0,93	0,82	12,00	16,84	20,42
<i>Stryphnodendron pulcherrimum</i> (Wiild.) Hochr.	42	0,57	1,27	0,87	9,66	33,80	17,15
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz et Pav.) Cham.	5	0,53	0,74	0,61	10,60	20,50	15,11
<i>Pouteria pariry</i> (Ducke) Baehni	4	0,93	1,00	0,97	8,00	20,44	19,66
<i>Tabebuia serratifolia</i> (Vahl) G. Nicholson	5	0,67	1,00	0,91	11,80	26,80	18,69
<i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart. ex DC.) Standl.	1	0,72	0,72	0,72	13,90	20,30	20,30
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez	1	0,52	0,52	0,52	12,00	28,33	12,00
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	18	0,58	1,10	0,91	8,00	26,00	18,04
<i>Eschweilera ovata</i> (Cambess.) Miers.	48	0,51	1,00	0,76	8,22	29,25	17,67
<i>Ocotea costulata</i> (Nees) Mez	3	0,60	0,70	0,65	13,31	15,00	17,25
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	2	0,54	0,64	0,59	10,96	16,44	14,16
<i>Licaria</i> spp.	14	0,53	1,04	0,74	8,58	24,82	15,75
<i>Nectandra rubra</i> (Mez) C. K. Allen	70	0,52	1,18	0,83	7,35	28,34	16,20
<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke	31	0,50	1,00	0,69	8,00	27,45	16,36
<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach	30	0,60	1,02	0,83	10,35	24,00	18,89
<i>Simarouba amara</i> Aubl.	22	0,53	1,00	0,78	8,30	21,60	16,38
<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	25	0,55	1,20	0,83	10,00	22,92	16,43
<i>Schefflera morototoni</i> (Aubl.)	1	0,68	0,68	0,68	9,40	17,30	17,30
<i>Astronium gracilis</i> Engl.	20	0,53	1,09	0,81	12,00	31,20	19,32
<i>Brosimum acutifolium</i> Huber	8	0,53	0,96	0,72	8,55	22,58	18,14
<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.	4	0,54	0,76	0,63	13,37	17,84	15,37
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	18	0,52	1,00	0,76	8,00	33,80	18,00
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don	22	0,51	1,13	0,75	9,08	28,00	17,85
<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers	1	1,18	1,18	1,18	14,40	14,40	14,40
<i>Erisma uncinatum</i> Warm.	3	0,76	1,11	0,90	16,20	22,73	18,43
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	14	0,55	1,09	0,84	8,00	27,05	15,45
<i>Diploptropis purpurea</i> (Kleinh.)	16	0,51	1,00	0,77	10,35	23,10	17,69
<i>Ceiba pentandra</i> . (L.) Gaerth	10	0,55	1,12	0,82	10,00	24,92	17,11
<i>Tachigali</i> sp.	12	0,54	0,87	0,67	10,00	28,00	14,93

<i>Buchenavia capitata</i> (Vahl) Eichl.	1	1,00	1,00	1,00	26,00	26,00	26,00
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	1	1,13	1,13	1,13	17,27	17,27	17,27
<i>Eschweilera parviflora</i> (Aubl.) Miers	25	0,53	1,14	0,82	8,00	30,00	16,27
<i>Piptadenia suaveolens</i> Miq.	12	0,63	1,12	0,81	13,64	28,00	17,93
TOTAL	681	0,50	1,46	0,81	7,03	33,80	17,18

O volume real do fuste (equação 1) de cada árvores-amostra foi determinado pelo método de cubagem rigorosa desenvolvido por Smalian com medições diamétricas sucessivas de 2 em 2 m ao longo do fuste (com casca) até a última secção que podia ser menor ou igual a 2 m de comprimento (Figura 11) (FRANCEZ et al., 2017).

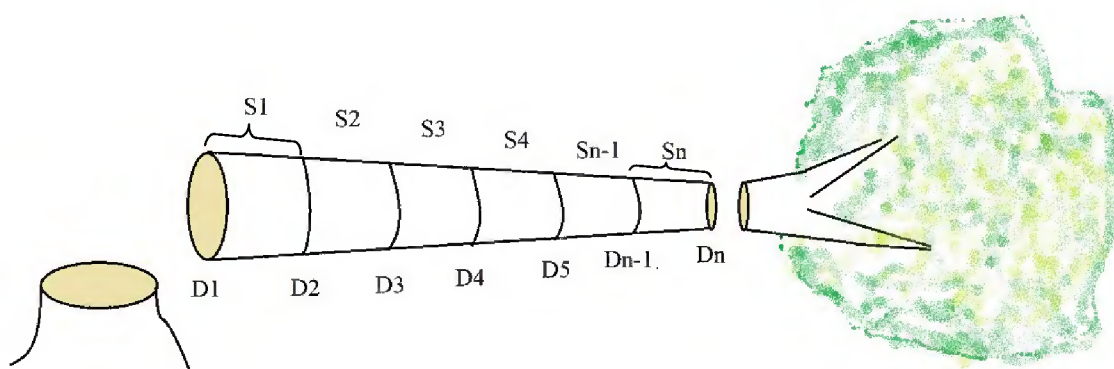


Figura 11: Método de Smalian para a cubagem rigorosa de cada árvore-amostra, Onde: S são as seções de 2 em 2m, D os diâmetros de cada extremidade das seções e Sn é a última seção ($\leq 2m$). Fonte: Autor.

$$VR = \sum_{i=1}^n (g1 + g2) * L/2 \quad \text{equação 1}$$

Onde: VR = Volume real (m^3); g_1 = Área transversal da secção maior (m^2), g_2 = Área transversal da menor (m^2), g_2 = Área transversal da maior (m^2), L = Comprimento da secção (m), n = Número de seções.

Para comparar a precisão volumétrica das diferentes formas de modelagem tendo em vista diferentes tamanhos de árvores-amostra, primeiramente foram separados de forma aleatória, 100 árvores-amostra do total de 681 indivíduos cubados na área de estudo. Essas 100 árvores-amostra não fizeram parte do processo de modelagem volumétrica e foram utilizadas para validação dos melhores modelos selecionados. As 581 árvores-amostra restantes foram utilizadas para compor oito tamanhos de árvores-amostras diferentes (com 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 árvores), sendo que, para cada tamanho de amostra, as árvores foram selecionadas de forma randômica, porém preservando a distribuição diamétrica do total das árvores-amostra usadas (Tabela 9).

Tabela 9. Número de árvores por classe diamétrica utilizadas para construir e validar os modelos de volumes analisados.

Classes diamétrica	Total de Árvores	Árvores para validação	Árvores para ajuste							
			3	6	10	13	21	28	37	47
50 a 59,9	87	15	3	6	10	13	21	28	37	47
60 a 69,9	171	20	3	7	10	14	21	29	37	47
70 a 79,9	148	19	3	7	10	14	21	29	37	47
80 a 89,9	101	15	3	7	10	14	21	29	37	47
90 a 99,9	91	15	3	6	10	14	21	29	37	47
100 a 109,9	46	8	3	6	10	13	20	28	37	37
110 a 119,9	28	4	3	6	10	13	20	23	23	23
120 a 129,9	5	2	2	3	3	3	3	3	3	3
130 a 139,9	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
140 a 149,9	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total	681	100	25	50	75	100	150	200	250	300

Os métodos de estimativa volumétrica testados neste trabalho foram: (i) fator de forma 0,7, (ii) fator de forma médio, (iii) modelo volumétrico por regressão linear de simples e dupla entrada e (iv) redes neurais artificiais, com um neurônio (DAP) e dois neurônios (DAP e h) na camada de entrada. Os métodos foram comparando estatisticamente com o volume real obtido pela cubagem rigorosa pelo método de Smalian.

4.2.3 Modelagem volumétrica pelo fator de forma 0,7

Para os diferentes tamanhos de árvores-amostra selecionados (25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 árvores), foi estimado o volume individual de cada árvore multiplicando o volume do cilindro pelo fator de forma 0,7. Este cálculo, é descrito pela seguinte expressão matemática:

$$vff = g \cdot hc \cdot ff \quad \text{equação 2}$$

onde: vff = volume estimado pelo fator de forma (m^3); g = área transversal de cada árvore à altura do peito (m^2), h_c = altura comercial (m) e ff = fator de correção ou fator de forma (0,7) utilizado na Amazônia obtido pelo trabalho de Heinsdijk (1958).

4.2.4 Modelagem volumétrica pelo fator de forma médio

O fator de forma médio para o volume do fuste comercial foi determinado por meio da seguinte equação:

$$ff_{\text{m\u00e9dio}} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{\text{REAL}}/VC_{1,30h}}{n} \quad \text{equa\u00e7\u00e3o 3}$$

em que: $ff_{\text{m\u00e9dio}}$ = Fator de forma; V_{REAL} = Volume da \u00e1rvore, em m^3 , determinado pelo m\u00e9todo de Smalian; $VC_{1,30h}$ = Volume do cilindro a partir do di\u00e2metro medido a 1,30 metros do solo e n = n\u00famero total da amostra.

A estimativa dos volumes comerciais usando o fator de forma m\u00e9dio \u00e9 dada pela equa\u00e7\u00e3o:

$$vff_{\text{m\u00e9dio}} = g.hc.ff_{\text{m\u00e9dio}} \quad \text{equa\u00e7\u00e3o 4}$$

onde: $vff_{\text{m\u00e9dio}}$ = volume (m^3) estimado pelo fator de forma m\u00e9dio.

4.2.5 Modelagem volum\u00e9trica por regress\u00e3o linear

Foi ajustado o modelo de regress\u00e3o linear de dupla entrada de Schumacher e Hall (equa\u00e7\u00e3o 5) e o modelo logar\u00edtmico de simples entrada de Husch (equa\u00e7\u00e3o 6) para cada tamanho diferente de \u00e1rvores-amostra. Esses modelos foram escolhidos por serem sugeridos comumente por diversos autores que trabalharam na Amaz\u00f4nia brasileira (BARRETO et al., 2014; GIMENEZ et al., 2015).

$$\ln(v) = \ln \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(\ln DAP) + \hat{\beta}_2 (\ln hc) + \varepsilon_i \quad \text{equa\u00e7\u00e3o 5}$$

$$\ln(v) = \ln \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 (\ln DAP) + \varepsilon_i \quad \text{equa\u00e7\u00e3o 6}$$

onde: v = volume total do fuste da \u00e1rvore (m^3); $\ln(\beta_0)$ = Coeficiente intercepto; β_1 e β_2 = Coeficiente angular; DAP = di\u00e2metro \u00e0 altura do peito (cm); hc = Altura comercial (m); \ln = logaritmo neperiano.

4.2.6 Modelagem volum\u00e9trica por RNA's

As RNAs foram treinadas para cada um dos diferentes tamanhos de \u00e1rvores-amostra selecionados, utilizando o software livre NeuroForest\u2122 4. Primeiramente, as vari\u00e1veis num\u00e9ricas foram normalizadas linearmente no intervalo de 0 a 1, com o intuito de que a m\u00e9dia calculada sobre todo o conjunto de treinamento esteja pr\u00f3ximo de zero, ou que seja pequena em compara\u00e7\u00e3o ao desvio-padr\u00e3o (LEAL et al., 2015). Foram utilizadas as

configurações de RNA's do tipo Multilayer Perceptron (MLP), que possui a capacidade universal de aproximação de funções matemáticas lineares (HORNÍK et al., 1989). O software permite a utilização de apenas uma camada oculta, por ser o suficiente para uma rede MLP realizar a aproximação de qualquer função contínua (HAYKIN, 2001; SCHIKOWSKI, et al., 2015).

Posteriormente foi utilizado o tipo de treinamento Resilient Propagation RPROP+, com função de ativação sigmoideal na camada oculta e na camada de saída. O algoritmo de treinamento Resilient Propagation, descrito por Riedmiller e Braun (1993), representa uma variante do algoritmo backpropagation (retropropagação do erro), apresentando por vezes um resultado superior, uma vez que, o ajuste dos seus pesos depende mais do sinal dos gradientes de erro e não de sua magnitude (RIEDMILLER; BRAUN, 1993).

A camada de entrada foi constituída de 1 (DAP) e 2 neurônios (DAP e h), sendo um neurônio para cada variável numérica preditora em função da variável resposta/saída (volume comercial). Foram escolhidas duas arquiteturas, uma do tipo 1-8-1 (DAP) e outra do tipo 2-8-1 (DAP e h), variando a entrada com um ou dois neurônios, todas com oito neurônios na camada oculta e apenas uma saída.

No processo de modelagem das RNA's foi realizado um total de 300 treinamentos para cada tamanho de árvores-amostra selecionadas totalizando 4800 treinamentos. Após os 300 treinamentos, foi selecionada a melhor RNA, com base na correlação entre o volume observado e o volume estimado pelas RNA's (Equação 8) e na estabilidade dos índices de treinamento das RNA's.

$$r_{v\hat{v}} = \frac{\text{cov}(v, \hat{v})}{\sqrt{s^2(v)s^2(\hat{v})}} \quad \text{equação 8}$$

onde, $r_{v\hat{v}}$ = correlação entre os valores estimados e reais; v = valores dos volumes observados, \hat{v} = valores dos volumes estimados, s^2 variância, cov: covariância.

4.2.7 Comparação entre os métodos de modelagem volumétrica em diferentes tamanhos de árvores amostra

As precisões dos modelos ajustados para diferentes números de árvores-amostras foram comparadas por meio do erro padrão da estimativa percentual (equação 9) ou erro padrão da estimativa percentual recalculado para a correção dos modelos logarítmicos ($S_{y,x,r}\%$). O erro padrão é o desvio dos valores previstos da variável dependente ao redor da

linha de regressão estimada, ou seja, quanto menor for o erro padrão, mais preciso é o modelo ajustado.

$$S_{y.x\%} = \frac{\sqrt{QM_r}}{\bar{v}_{real}} \cdot 100 \quad \text{equação 9}$$

Os modelos também foram comparados por meio do critério de Informação Bayesiano (BIC), também conhecido como critério de Schwarz (1978) (equação 10), que tem como pressuposto a existência de um “modelo verdadeiro” que descreve a relação entre a variável dependente e as diversas variáveis explanatórias entre os diversos modelos sob seleção. Assim, o critério foi definido como a estatística que maximiza a probabilidade de se identificar o verdadeiro modelo dentre os avaliados.

$$BIC = -2 \ln(SQR) + \ln(n) p \quad \text{equação 10}$$

onde: BIC = critério de informação Bayesiano ou de Schwarz (1978); n = número de observações da amostra, SQR = Soma dos quadrados do resíduo, p = número de parâmetros do modelo, que para as RNA's foram considerados os neurônios na camada de entrada (DAP e ou altura) e oito neurônios na camada oculta.

O BIC permite a comparação entre modelos não aninhados e penalizam modelos com maior número de parâmetros, tendendo a favorecer modelos mais parcimoniosos (NUNEZ-ANTÓN; ZIMMERMAN, 2000). Os menores valores para BIC indicam menor discrepância geral estimada, o seja, menor é a distância relativa dos valores estimados com relação aos valores reais, portanto, proporcionam um meio eficaz para comparação entre modelos (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Sendo assim, para cada método de modelagem volumétrica foi selecionado como melhor modelo aquele que apresentaram os menores valores de BIC entre os diferentes tamanhos de árvores-amostra analisados.

Em seguida, para cada um dos modelos ajustados, foi realizado o teste F de Graybill (GRAYBILL, 1976) para comparar o volume observado e o volume estimado das 100 árvores-amostra que não participaram dos processos de modelagem volumétrica. O volume observado foi obtido através do ajuste de regressão linear expressa por:

$$v_{obs} = \beta_0 + \beta_1 v_{est} \quad \text{equação 11}$$

em que vobs = volumes observados (m^3), vest = volumes estimados (m^3), pelo modelo ajustado, β_1 = coeficientes a serem estimados.

Posteriormente foi verificado ao se testar a hipótese nula (H_0) de que o coeficiente β_0 e β_1 são estatisticamente iguais a 0 e 1, respectivamente, contra a hipótese alternativa (H_1) de rejeição. Para testar a hipótese formulada, aplicou-se a estatística F proposta por Graybill (1976) obtido pela seguinte expressão matemática:

$$F(H_0) = \frac{(c'\hat{\beta}-\theta)'[c'(X'X)^{-1}c]^{-1}(c'\hat{\beta}-\theta)}{p\hat{\sigma}^2} \quad \text{equação 12}$$

em que X = volume estimado; $c' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $[\beta_0 \ \beta_1]$ = vetor transposto dos coeficientes da equação estimada; θ [0 1]; X = matriz dos volumes estimados; X' = matriz X transposta; $X'X$ = matriz X transposta multiplicada pela matriz X; p = posto da matriz c' ; $\hat{\sigma}^2$ = quadrado médio do resíduo; e $F_{tab} = [\alpha; \text{posto de } c'; n - \text{posto}(X)]$, para ($\alpha = 0,01$).

Foi elaborado um “ranking” para a precisão volumétrica dos modelos ajustados. Cada modelo recebeu uma classificação (pontuação) quanto ao melhor ajuste em relação ao menor erro padrão da estimativa ($S_{y,x} \%$), menor critério de informação Bayesiano (BIC) e o menor F de identidade de Graybill; essas pontuações foram chamadas de Classificação 1, 2 e 3, respectivamente. Após essas classificações específicas, foi feita a soma das pontuações e as mesmas foram ranqueadas da menor para a maior, sendo assim, os modelos que receberam os menores valores foram definidos como os mais adequados para estimar o volume na área estudada.

Para avaliar a exatidão (acurácia) dos modelos volumétricos ajustados por cada método para diferentes números de árvores-amostras, ou seja, para verificar se os volumes médios estimados pelos modelos volumétricos ajustados se aproximaram do volume observado (volume real), também foram utilizadas as 100 árvores-amostra que não participaram dos processos de modelagem volumétrica.

Seis métodos de estimativa volumétrica para oito tamanho diferentes de árvores-amostra formaram um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial de (6 x 8). Os dados do volume estimado e o volume real das árvores-amostra foram transformados pelo método de Box-Cox para a condução da Análise de Variância (ANOVA). Essa ação foi necessária para identificar o valor lambda (λ) que maximiza o estimador de máxima verossimilhança e minimiza o resíduo do modelo fatorial a ser empregado na ANOVA.

Quando necessário as médias foram comparadas utilizando o teste de comparação múltipla de Tukey. Todas as análises foram consideradas ao nível de 95% de probabilidade e realizadas no Programa R 3.4.4 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, AT).

4.3 Resultados

4.3.1 Precisão da estimativa dos modelos volumétricos ajustados

Todos os modelos ajustados apresentaram boa precisão da estimativa volumétrica, com exceção dos fator de forma 0,7 e o fator de forma médio, pois ambos não foram validados pelo teste F de Graybill, por apresentarem um F calculado bem maior que o F tabelado (3,09), ou seja, os volumes estimados pelo fator de forma 0,7 e fator de forma médio foram diferentes estatisticamente dos volumes observados (Apêndice 4). Dentre os melhores desempenhos de acordo com o “ranking” de precisão e validação dos modelos volumétricos a equação de dupla entrada proposta por Schumacher e Hall ocupou oito posições dentre os dez melhores modelos ranqueados, com o destaque para o modelo ajustado por meio de 300 árvores-amostra, que ocupou o primeiro lugar no (Tabela 10 Apêndice 4).

Tabela 10: Parâmetros da precisão da estimativa volumétrica para cada método sobre os diferentes números de árvores-amostra no município de Novo Repartimento-Pará. Erro padrão da estimativa ($Sy.x\%$), erro padrão da estimativa recalculado ($Sy.xr\%$), critério de informação Bayesiano (BIC) dos diferentes modelos volumétricos nos diferentes números de árvores-amostra (n), teste F de Graybill (F), classificação do modelo avaliado (C1, C2, C3).

MODELOS	Verificação						Validação		Soma C1,C2,C3	Rank
	n	$Sy.x\%$	$Sy.xr\%$	C1	BIC	C2	F	C3		
Logarítmico de Schumacher e Hall	25		12.78	4	-135.89	27	0.75	15	46	5
	50		16.25	15	-252.10	25	0.93	16	56	10
	75		12.32	3	-426.02	18	1.76	21	42	4
	100		13.41	5	-549.03	17	2.20	24	46	5
	150		13.53	8	-825.20	13	3.63	32	53	9
	200		13.60	9	-1101.16	8	1.59	20	37	3
	250		13.48	6	-1383.66	4	2.55	26	36	2
	300		14.26	10	-1628.64	1	1.55	19	30	1
Logarítmico de Husch	200		24.31	33	-873.13	12	0.39	11	56	10
	250		24.09	32	-1097.75	9	0.31	8	49	7
	300		24.44	34	-1255.40	5	0.66	12	51	8
RNA (DAP e H)	25	10.26		1	19.79	34	0.70	13	48	6
	200	14.55		12	58.28	39	0.03	2	53	9

Posteriormente se destaca a equação de simples entrada proposta por Husch, ajustada através da regressão linear, a partir de 200 árvores-amostra. As RNA's também se destacaram entre os dez melhores modelos ranqueados com utilização de somente 25 e 200 árvores-amostra (Tabela 10, Apêndice 4).

4.3.2 Exatidão dos modelos volumétricos ajustados

Avaliando a exatidão dos modelos volumétricos ajustados por cada método para diferentes números de árvores-amostras, foi verificado que o volume estimado por todos os modelos ajustados neste estudo variou entre 5,15 e 5,92 m³, não havendo diferença significativa entre eles e com o volume real observado de 5,29 m³ (F calculado = 0,295, $p = 0,999$) (Figura 12). Mas vale destacar que, a utilização do fator de forma 0,7 estimou os volumes de árvores com mais exatidão, assim como os modelos de dupla entrada de Schumacher e Hall ajustados por análise de regressão por meio da utilização de 25, 75, 100 e 150 árvores-amostra (Figura 12). O modelo de simples entrada de Husch para 150 árvores-amostra e a aplicação das RNA's com o DAP e altura nos neurônios da camada de entrada para 100 e 150 árvores-amostra, também apresentaram uma boa exatidão quando comparado ao volume observado (Figura 12).

Para os modelos de Schumacher e Hall, Husch e RNA em destaque, os valores estimados foram iguais estatisticamente aos volumes observados, uma vez que o F calculado foi menor do que o F tabelado (3,09) a 5% de probabilidade de erro, perfazendo uma linha reta que passa pela origem com declividade igual a 1 (Figura 13). Vale destacar que, nos modelos de Schumacher e Hall, a tendência média dos volumes estimados quase se sobrepôs a tendência média dos volumes reais (Figura 13). Ao aplicar o fator de forma 0,7, foi verificado que os volumes estimados são estatisticamente diferentes aos valores reais, uma vez que o F calculado (12,06) foi bem maior ao F tabelado (3,09). Assim, a aplicação do fator de forma 0,7 pode ser até ter uma boa exatidão, mas não uma boa precisão, uma vez que os volumes são superestimados nas menores árvores e superestimados nas maiores árvores, bem diferente dos modelos ajustados pelos demais métodos (Figura 13).

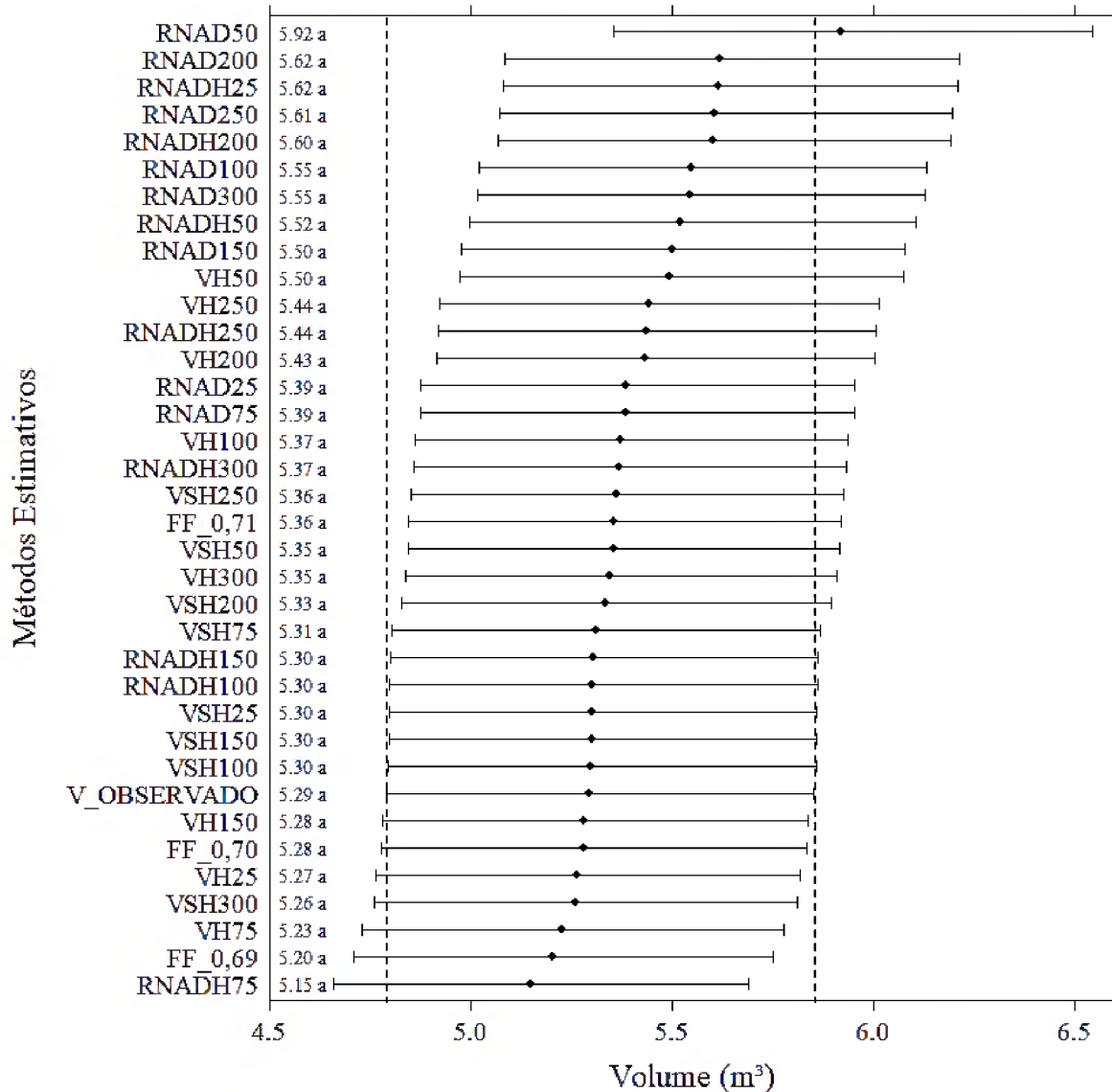


Figura 12: Comparação entre as médias dos volumes estimados e o volume observado para as 100 árvores-amostra que não fizeram parte da modelagem volumétrica, seguidas dos seus respectivos intervalos de confiança (eixo x), por cada método de estimativa para os diferentes tamanhos de árvores-amostra (eixo y). Onde, VSH= volume estimado por Schumacher e Hall, VH= volume estimado por Huch, RNADH= redes neurais artificiais com DAP e altura, RNAD= redes neurais artificiais com DAP, FF_0,71= fator de forma 0,71, FF_0,70= fator de forma 0,7, FF_0,69= fator de forma 0,69. Linhas tracejadas, significam o intervalo de confiança dos volumes observados (V_OBSERVADO). Números a esquerda do gráfico correspondem aos volumes estimados por seus respectivos modelos e o volume observado, seguidos de letras iguais, que denotam igualdade estatística pela ANOVA a 5%.

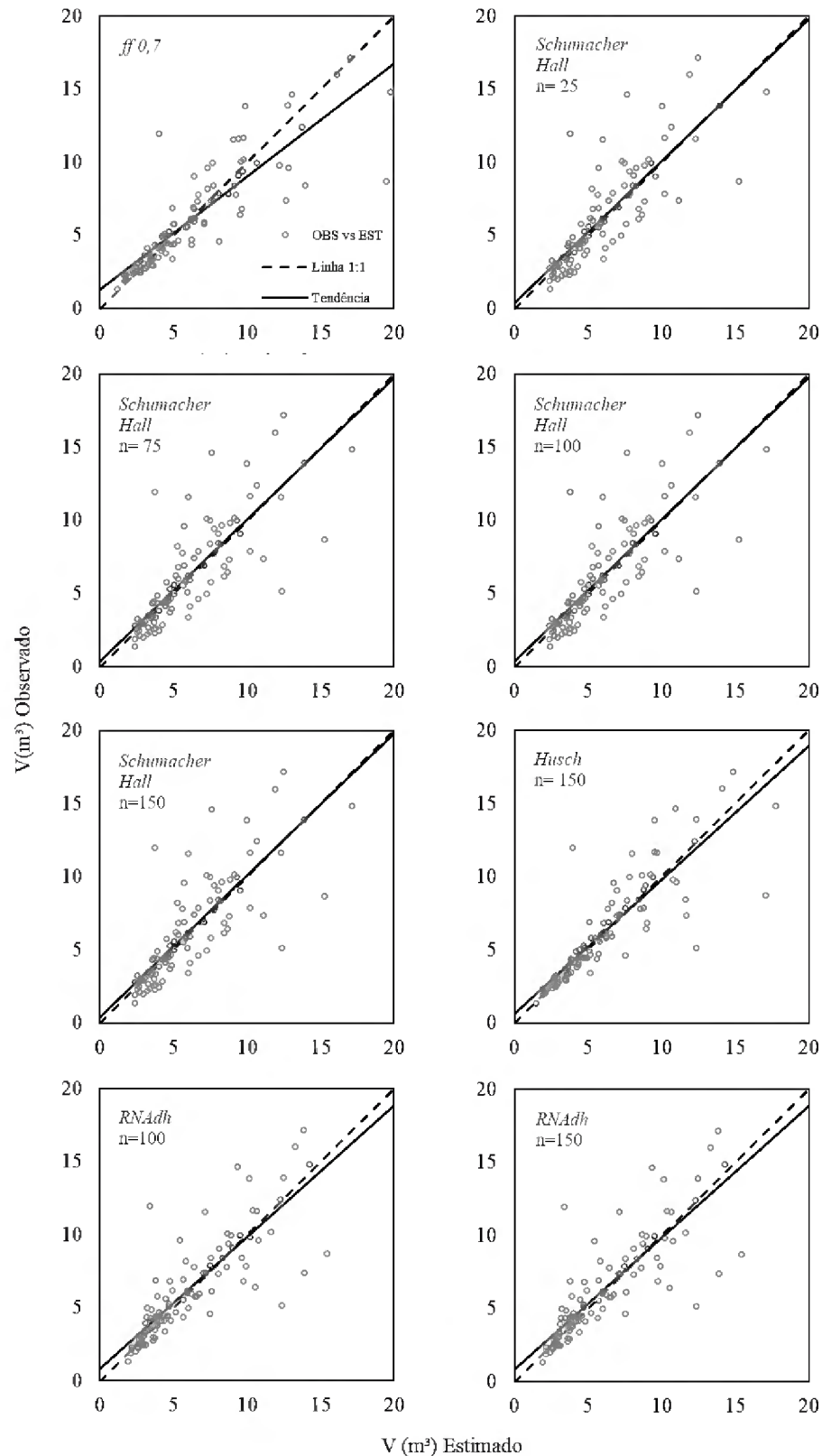


Figura 13: Volumes observados (linha tracejada) versus volumes estimados para as 100 árvores amostras que não fizeram parte da modelagem volumétrica (linha contínua), a partir dos diferentes métodos de modelagem volumétrica para diferentes números de árvores amostra (n) no município de Novo Repartimento-Pará. Modelo com fator de forma 0,7 (ff 0,7), modelo de dupla entrada proposto por Schumacher e Hall, modelo de simples entrada proposto por Husch, redes neurais com dupla entrada (RNAdh).

4.4 Discussão

A estimativa volumétrica realizada pela aplicação do fator de forma 0,7 foi menos precisa em relação aos volumes estimados pelos os demais modelos testados no estudo, semelhantemente aos resultados obtidos por Rolim et al. (2006) na Floresta Nacional de Tapirapé-Aquirí, localizada na Serra dos Carajás, estado do Pará. No entanto, se tratando de exatidão, a média da estimativa volumétrica pelo fator de forma 0,7 foi mais acurada, sendo muito próxima a média do volume observado, o que torna essa opção metodológica interessante por não possuir grandes limitações em relação aos demais métodos, além de ser um método prático e didático.

O emprego do fator de forma se torna uma opção viável para ser utilizada em inventário florestal amostral, onde o principal objetivo é estimar a média volumétrica de forma rápida e com exatidão (SANQUETA et al., 2016, LEÃO et al., 2018). As estimativas volumétricas obtidas pelo fator de forma 0,7 não passaram no teste F de Graybill, por apresentar uma tendência muito forte em superestimar os volumes das árvores maiores. Desta forma, a utilização do fator de forma único para toda a amplitude de tamanho das árvores se torna inviável, pois o seu desempenho para as classes de tamanhos maiores é muito pior quando comparado aos modelos ajustados através de RNA's e regressão linear. A falta de precisão pode ser explicada pela variação das diferentes formas das árvores, que são influenciadas pela quantidade de espécies, tipo do sítio, competição intra e interespecífica e idade da floresta (SCOLFORO; THIERSCH, 2004).

Dentre os métodos de modelagem volumétrica que apresentaram uma boa precisão e uma boa exatidão, está a aplicação das redes neurais artificiais com a utilização do DAP e altura comercial nos neurônios da camada de entrada a partir da utilização de 100 árvores-amostra. Resultados semelhantes foram já mostrados por Rodrigues et al., (2010) em um plantio da espécie *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke, situado no município de Dom Eliseu, estado do Pará e por Santos et al. (2018), para a espécie *Couratari stellata* A.C.Sm. na Floresta Nacional de Tapajós, também no Pará.

As RNA's apresentam boa capacidade de aplicar o conhecimento adquirido no treinamento de dados desconhecidos como as árvores-amostra que não fizeram parte da geração do modelo, em outras palavras, as RNA's apresentam boa capacidade de generalização (BINOTI, 2014). Isso ocorre devido ao excelente desempenho no aprendizado através dos treinamentos, onde as RNA's conseguem ajustar seus pesos sinápticos (valores atribuídos as conexões neurais) de acordo com os exemplos apresentados para as RNA's até

que não haja mais erros, ou seja, até que a rede se comporte como um sistema desejado (SILVA et al., 2010).

Uma outra vantagem das RNA's é a capacidade de tolerar falhas e ruídos como observações atípicas (outlier) e dados tendenciosos, ao ponto de separá-los das informações relevantes afetando de forma positiva no funcionamento da rede (BINOTI, 2014). Isso acontece devido ao grande nível de interconexões entre os neurônios artificiais, ou seja, os erros em um ou pequenos números de neurônios não conseguem se propagar ao ponto de comprometer o funcionamento correto do sistema neural, o que torna a RNA's robusta e confiável (HAYKIN, 2001, BINOTI, 2014, SILVA et al., 2010). As RNA's neste estudo, apresentaram seu melhor desempenho utilizando somente 25 números de árvores-amostra, o mesmo número mínimo utilizado pelo método da regressão linear, que também mostrou um bom desempenho em termos de precisão e exatidão.

Uma desvantagem do emprego das RNA's para a estimativa do volume, seria o tempo de ajuste, que é maior do que o da regressão, pois para as RNA's apresentarem um modelo bem preciso e exato a mesma necessitaria de muitos treinamentos, elevando bastante o tempo de execução deste método (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014). Uma outra desvantagem é que as RNA's não são uma técnica paramétrica e seus resultados não permitem estimar o intervalo de confiança para seus "coeficientes", sendo muito influenciado pelo tamanho de amostra, ou seja, quanto maior o número de amostra, maior é o tempo de execução da RNA, sem falar que as mesmas não geram uma equação física, diferentemente do método de modelagem através do emprego de regressão linear (SILVA et al., 2010).

O modelo de dupla entrada proposto por Schumacher e Hall ajustado pelo emprego da regressão linear, obteve a maior precisão da estimativa com os tamanhos (n) de 25, 75, 100 e 150 árvores-amostra. Esse resultado já era esperado para a regressão linear, uma vez que quanto maior for o número de variável independente, maior será a precisão da estimativa, desde que essas variáveis independentes não apresentem multicolinearidade (KNOFCZYNSKI; MUNDFROM, 2008). Sendo assim, a utilização de 25 árvores-amostra seria o suficiente para ajustar com precisão e exatidão um modelo de dupla entrada na área estudada.

Segundo o capítulo 3 desta tese, na seleção de 25 árvores-amostra para compor um modelo volumétrico de dupla entrada, existe um risco de 20% desse conjunto de amostra apresentar imprecisão estatística, mas se for utilizado entre 75 e 100 árvores-amostra esse risco pode cair de 3% a 1%. No entanto, este modelo utiliza como variável independente a altura do fuste das árvores, que é medida obtido por meio de instrumentos ópticos ou estimada

visualmente de forma empírica visualmente sem instrumento pelo mensurador, tornando o trabalho de campo mais demorado e oneroso, principalmente se as copas das árvores não apresentarem fácil visibilidade, o que pode resultar em erros de estimativa da altura (BERGER et al., 2012).

A incorporação da variável independente altura em um modelo volumétrico, podem adicionar erros não amostrais, afetando consideravelmente as estimativas do volume das árvores, propiciando a propagação de erros em outras variáveis dependentes (BERGER et al., 2013). Este fato pode trazer consequências para a estimativa volumétrica do próximo ciclo produtivo, podendo afetar o planejamento da próxima UPA. Outro fator é o tempo perdido durante mensuração da variável altura do fuste no momento do inventário florestal, pois com a utilização do hipsômetro, a determinação da altura do fuste pode chegar a 15 minutos por árvore inventariada, isso ocorre devido à dificuldade de se visualizar as copas das árvores no dossel da floresta (FERREIRA et al., 2011).

O modelo de simples entrada proposto por Husch ajustado pelo emprego da regressão linear obteve uma boa precisão e exatidão da estimativa volumétrica para a utilização de 150 e 200 árvores-amostra. De acordo com o terceiro capítulo desta tese, o risco de a seleção aleatória da quantidade de árvores-amostra citadas acima ajustar um modelo impreciso é de 13 a 9% respectivamente, sendo considerado bom se tratando de um modelo que possui somente o DAP com variável independente (Capítulo 3). Neste caso, o modelo de simples entrada proposto por Husch se torna a opção mais prática e robusta para estimar o volume de árvores em pé na etapa do inventário florestal, pois utiliza somente uma variável independente de fácil medição (DAP) para estimar o potencial volumétrico de uma unidade de manejo florestal sustentável.

Vale ressaltar que é muito importante levantar dados acima do mínimo definido neste estudo, para posteriormente testar e validar os modelos volumétricos ajustados. Adicionalmente, é importante ressaltar que o conjunto de árvores-amostra, tanto para o ajuste, quanto para a validação dos modelos ajustados, considere a distribuição diamétrica das espécies de interesse comercial, afim de contemplar a variabilidade na forma de crescimento das árvores.

4.5 Conclusão

Os métodos de modelagem volumétrica individual de árvores apresentaram precisão e exatidão diferentes, nas estimativas do volume de árvores em pé, para os diferentes tamanhos de árvores-amostra testados neste estudo. Sendo assim, a utilização do fator de forma 0,7 é o mais indicado para inventários florestais no sudeste paraense, onde o objetivo principal é a estimativa do volume médio das árvores comerciais de forma exata e rápida.

Para inventários florestais onde o objetivo é a obtenção do volume estimado com precisão e exatidão ao longo da distribuição das classes diamétricas, é indicado a utilização do modelo de regressão ajustado de Schumacher-Hall com a utilização de no mínimo 75 árvores-amostra ou o emprego de redes neurais artificiais com DAP e altura comercial na camada de entrada com no mínimo 100 árvores-amostra. No entanto, esse modelo necessita da altura do fuste, que é uma variável de difícil obtenção no momento do inventário florestal. Desta forma, apesar do modelo de simples estrada de Husch necessitar de no mínimo 150 árvores-amostra, para garantir um modelo com boa precisão e exatidão, esse método passa a ser a alternativa mais prática para ser utilizada no inventário florestal, se tornando viável para subsidiar o planejamento e estabelecimento de ações de manejo para a Floresta Amazônica, pois utiliza somente a variável de fácil medição (DAP).

4.6 Referências Bibliográficas

AKKOÇ, S. An empirical comparison of conventional techniques, neural networks and the three-stage hybrid Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) model for credit scoring analysis: The case of Turkish credit card data. **European Journal of Operational Research**, v. 222, n. 1, p. 168-178, 2012.

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

BARRETO, W.F.; LEÃO, F.M.; MENEZES, M.C.; SOUZA, D.V. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 34, n. 80, p. 321-329, 2014.

BARROS, P.L.C.; SILVA JUNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapu, oeste do estado do Pará, Amazônia oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 51, n. 1, p. 115-126, 2009.

BERGER, A.; GSCHWANTNER, T.; GABLER, K.; SCHADAUER, K. Analysis of tree measurement errors in the Austrian National Forest Inventory. **Austrian Journal of Forest Science**. v. 129, n. 3, p. 149-177, 2012.

BERGER, A.; GSCHWANTNER, T.; MCROBERTS, R.E.; SCHADAUER, K. 2013. Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian National Forest Inventory. **Forest Science**. v. 60, n. 1, p. 14-24, 2013.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 639 – 645, 2013.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 5, n. 1, p. 10-12953, 2014.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 248 p.

BRASIL. Resolução Conama nº 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, seis de fevereiro de 2009.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in Model Selection. **Sociological Methods and Research**. v. 33, n. 2, p. 261-304, 2004.

CASTELLANOS, A.; BLANCO, A. M.; PALENCIA, V. Applications of radial basis neural networks for arca forest. **International Journal Information Theories and Applications**, v.14, n. 3, p.218-222, 2007.

CORDEIRO, M. A; PEREIRA, N. N. DE J.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. DA S.; LEITE, H. G. Estimativa do volume de *Acacia mangium* utilizando técnicas de redes neurais artificiais e máquinas vetor de suporte. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 255261, 2015.

DIAMANTOPOULOU, M. J.; MILIOS, E. Modelling total volume of dominant pine trees in reforestations via multivariate analysis and artificial neural network models. **Biosystems engineering**, v. 105, n. 3, p. 306-315, 2010.

FERREIRA, J.C.S.; SILVA, J.A.A.; MIGUEL, E.P.; ENCINAS, J.I.; TAVARES, J.A. Eficiência relativa de modelos volumétricos com e sem a variável altura da árvore. **Acta tecnológica**. v. 6, n. 1, p. 89-102, 2011.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S.A.; MIRANDA, R.O.V.; RETSLAFF, F.A. S. **Compêndio de equações de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil**. Curitiba: Os autores, 2014, 306 p.

FRANCEZ, L.M.B; BATISTA, F.J.; TAKEHANA, C.L.I; BARROS, P.L.C.; SOUZA, D.V.; CORUMBÁ, W.C.; RAMOS, E.M.L. S. **Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável – PMFS**. Belém: Edufra, 100 p. 2017.

GIMENEZ, B.O.; DANIELLI, F.E.; OLIVEIRA, C.K.A.; SANTOS, J; HIGUCHI, N. 2015. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis**. v. 43, n. 106, p. 291-301, 2015.

GRAYBILL, F. A. **Theory and application of linear model**. Massachusetts: Belmont Ouxbury press, 1976, 704 p.

GUIMARÃES, D.P.; LEITE, H.G. Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**. v. 50 n. 6, p, 37-42, 1996.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 898 p.

HEINSDIJK, D. **Report to the government of Brazil on a forest inventory in the Amazon Valley (region between rio Xingu and rio Tocantins)**. Roma: FAO, 1958, 93p.

HIGUCHI, N.; RAMM, W. Developing bole wood volume equations for a group of tree species of central Amazon (Brazil). **The Commonwealth Forestry Review**, v. 64, n. 1, p. 33-41, 1985.

HORNIK, K.; STINCHCOMBE, M.; WHITE, H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. **Neural networks**, v2, n. 5, p. 359-366, 1989.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. 2016. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2015_v30.pdf>. Accessed on 19/01/2018.

KNOFCZYNSKI, G.T.; MUNDFROM, D. Sample sizes when using multiple linear regression for prediction. **Educational and psychological measurement**. v. 68, n. 3, p. 431-442. 2008.

LACERDA, T. H. S.; CABACINHA, C. D.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; MAIA, R. D.; LACERDA, K. W. D. S. Artificial neurais networks for estimating tree volume in the brazilian savanna. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 483-491, 2017.

LANSSANOVA, L.R.; SILVA, F.A.; SCHONS, C.T.; PERERIRA, A.C.D.S. Comparação entre diferentes métodos para estimativa volumétrica de espécies comerciais da Amazônia. **BIOFIX Scientific Journal** v. 1, n. 1, p 109-115, 2018.

LEAL, F. A.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p 233-249, 2015.

LEÃO, F.M.; DIONISIO, L.F.S.; SOUSA, L.D.C.M.; MENEZES, M.C.; OLIVEIRA, M.H.S.; NEVES, R.L.P. Sample intensity in ombrophilous open forest at Verde Para Sempre Extractive Reserve, Porto de Moz, PA. **Revista Agro@mbiente On-line**. v. 12, n. 1, p. 68-79, 2018.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2.ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2014, 316 P.

NUNEZ-ANTÓN, V.N.; ZIMMERMAN, D.L. Modelling non-stationary longitudinal data. **Biometrics**. v. 56, n. 3. p. 699 - 705, 2000.

RIBEIRO, R. B. S.; GAMA, J. R. V.; MELO, L. O. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 305 – 612, 2014.

RIEDMILLER, M.; BRAUN, H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. In: **Neural Networks, 1993., IEEE International Conference on**. IEEE, 1993. p. 586-591.

RODRIGUES, E. F.; OLIVEIRA, T. R.; MADRUGA, M. R.; SILVEIRA, A. M. Um método para determinar o volume comercial do *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 28, n. 1, p. 16-23, 2010.

ROLIM, S. G.; COUTO, H. D.; JESUS, R. D.; FRANÇA, J. T. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquirí, Serra dos Carajás (PA). **Acta Amazonica**, v. 36, n. 1, p. 107-114, 2006.

SANQUETTA, C.; DOLCI, M.; CORTE A. P. D.; SANQUETTA, M. N. I.; PELISSARI, A. L. Estimação de volumes de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze por fatores de forma em classes diamétricas e modelos de regressão. **Centro Científico Conhecer**, v. 13, n. 23, p. 588-597, 2016.

SANTOS, K. N. F.; RODE, R.; ANDRADE, D. F. C.; SANTOS, CORRÊA, K. K.; SOUSA LOPES, L. S. Ajuste de equações volumétricas e redes neurais artificiais na estimativa do volume de Tauari na Floresta Nacional do Tapajós. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 1-17, 2018.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **The annals of statistics**, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978.

SCHIKOWSKI, A. B.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Estudo da forma do fuste utilizando redes neurais artificiais e funções de afilamento. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 35, n. 82, p. 119-127, 2015.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria florestal: medição e volumetria de árvores florestais**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 310 p.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004, 285 p.

SEFA-PA. 2017. Secretaria de Fazenda do estado do Pará. **Boletim de preços mínimos de mercado – Madeira**. <http://sefa.pa.gov.br/legislacao/interna/portaria/ps2005_00354an0.pdf>. Accessed on 10/10/2018.

SEFA-PA - SECRETARIA DE ESTADO DE FAZENDA DO ESTADO DO PARÁ. **Boletim de preços mínimos de mercado – Madeira**. 2017. Belém. Disponível em: <http://sefa.pa.gov.br/legislacao/interna/portaria/ps2005_00354an0.pdf>. Acesso em: 10 Out. 2018.

SILVA, I. N.; SPATI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo, SP: Artliber, 2010. 399 p.

SNIF – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Recursos florestais**. 2016. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/2231-boletim-snif-recursos-florestais-2016>> Acesso em: 18 Dec. 2018.

SNIF – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Boletim SNIF 2017**. 2017. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/3230-boletim-snif-2017-ed1-final/file>> Acesso em: 18 Dec. 2018.

SULLIVAN, M.J.P.; LEWIS, S.L.; HUBAU, W.; QIE, L.; BAKER, T.R.; BANIN, L.F.; et al. Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 5, p. 1179-1189, 2018

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R.; SOUZA, H. S.; MOURA, J. P. V. M.; MAMORÉ, F. M. D.; SIQUEIRA, T. D. S. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 4, p. 556-569, 2015.

Apêndice 4

– Tabela dos parâmetros da precisão da estimativa volumétrica para cada método sobre os diferentes números de árvores-amostra no município de Novo Repartimento-Pará.

Tabela 1: Erro padrão da estimativa ($Sy.x\%$), erro padrão da estimativa recalculado ($Sy.xr\%$), critério de informação Bayesiano (BIC) dos diferentes modelos volumétricos nos diferentes números de árvores-amostra (n), teste F de Graybill (F), classificação do modelo avaliado (C1, C2, C3). Em negrito, os modelos de destaque.

MODELOS	Verificação						Validação		Soma C1,C2,C3	Rank
	n	$Sy.x\%$	$Sy.xr\%$	C1	BIC	C2	F	C3		
ff _{0,7}	25	28.13		45	-31.37	32	12.60	35	112	35
	50	28.91		48	-106.49	29	12.60	35	112	36
	75	20.56		24	-262.13	23	12.60	35	82	24
	100	18.56		20	-388.45	20	12.60	35	75	20
	150	18.34		18	-672.05	14	12.60	35	67	16
	200	21.26		26	-892.69	10	12.60	35	71	18
	250	20.31		23	-1216.75	6	12.60	35	64	14
	300	21.77		28	-1486.24	3	12.60	35	66	15
ff _{0,696}	25	28.57		46	-32.14	31	10.81	33	110	34
ff _{0,702}	50	28.76		47	-105.96	30	12.60	35	112	37
ff _{0,714}	75	19.71		22	-255.84	24	11.54	34	80	22
ff _{0,701}	100	18.49		19	-387.75	21	12.60	35	75	20
ff _{0,710}	150	17.87		17	-664.36	15	11.54	34	66	15
ff _{0,705}	200	20.93		25	-886.51	11	11.54	34	70	17
ff _{0,712}	250	19.69		21	-1201.26	7	11.54	34	62	12
ff _{0,699}	300	21.83		29	-1488.01	2	10.81	33	64	14
Logaritimico de Schumacher e Hall	25		12.78	4	-135.89	27	0.75	15	46	5
	50		16.25	15	-252.10	25	0.93	16	56	10
	75		12.32	3	-426.02	18	1.76	21	42	4
	100		13.41	5	-549.03	17	2.20	24	46	5
	150		13.53	8	-825.20	13	3.63	32	53	9
	200		13.60	9	-1101.16	8	1.59	20	37	3
	250		13.48	6	-1383.66	4	2.55	26	36	2
	300		14.26	10	-1628.64	1	1.55	19	30	1
Logaritimico de Husch	25		21.91	30	-111.07	28	2.08	23	81	23
	50		26.61	42	-205.60	26	0.33	10	78	21
	75		24.57	35	-322.45	22	2.75	27	84	26
	100		25.65	38	-422.94	19	3.10	29	86	27
	150		25.95	39	-633.73	16	2.94	28	83	25
	200		24.31	33	-873.13	12	0.39	11	56	10
	250		24.09	32	-1097.75	9	0.31	8	49	7

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese ampliou o conhecimento existente sobre a modelagem volumétrica para estimar o volume de árvores em pé gerando informações que podem subsidiar o planejamento e novas ações voltadas para o manejo sustentável na Amazônia brasileira.

Na primeira análise (Capítulo 2), a hipótese H1 foi parcialmente rejeitada, ou seja, o volume real, determinado pelo método de cubagem rigorosa de Smalian, é estatisticamente maior ao volume geométrico e ambos são similares ao volume aproveitável. Esse resultado indica que os dados de volume geométrico provenientes do romaneio das toras não podem ser utilizados no ajuste de equações volumétricas para estimar volume de árvores em pé em unidades de manejo florestal implantada no município de Anapu, estado do Pará.

Diferente do que é relatado na literatura foi verificado que as características morfológicas das espécies arbóreas não influenciam nos volumes de madeira obtidos pelas três práticas avaliadas, assim como as classes diamétricas.

Apesar de não haver diferença entre o volume aproveitável e o volume real, a perda de madeira ocorreu praticamente na metade das árvores avaliadas neste estudo; embora tenha sido um percentual pequeno de perda (6,5%), ela pode gerar implicações negativas em termos financeiros para os manejadores.

Na segunda análise (Capítulo 3), na qual se buscou determinar o número mínimo de árvores a serem cubadas para seis espécies de valor comercial, foi possível verificar que a aceitação ou rejeição das hipóteses H2 e H3 dependem da equação utilizada e do limite de erro amostral admissível. O uso do modelo de dupla entrada, considerando um limite de erro de 20%, garantiu o mínimo de 29 árvores-amostra para cada espécie, se consideradas individualmente, e 81 árvores-amostra para o conjunto das espécies. Já o uso do modelo volumétrico de simples entrada, considerando o mesmo erro, necessitaria de um número muito grande de amostras, maior do que o número de amostras utilizado nesse estudo. Todavia, se estabelecer um limite de erro de 35%, um número de 39 árvores-amostra para cada espécie e de 158 árvores-amostra para o conjunto das espécies seria o mínimo necessário.

Sendo assim, para estimar o volume de florestas nativas, o ajuste de equações volumétricas individuais para cada espécie é mais oneroso, pois além de precisar cubar muito mais árvores, encontrar a quantidade mínima de árvores-amostra para cada espécie

aumentaria o tempo e conseqüentemente os custos do levantamento em campo, não compensando economicamente para o empreendedor florestal.

Os resultados apresentados nesta tese mostram a necessidade de se considerar com mais seriedade a questão do número de árvores-amostra para predição volumétrica nas florestas da Amazônia brasileira. Existe um perigo potencial ao se propor um tamanho de árvores-amostra inadequado, mas também não se deve ignorar o efeito negativo no tempo e custo para a elaboração de uma equação volumétrica. Estudos adicionais sobre esse assunto, que busque determinar o equilíbrio entre o número de árvores-amostras e custo seguido do tempo do levantamento das árvores-amostra, poderiam ampliar os resultados desta pesquisa. Na terceira análise (Capítulo 4), na qual houve a comparação da precisão volumétrica das diferentes formas de modelagem do volume individual de árvores (fator de forma 0,7, fator de forma médio, regressão linear e RNA's) tendo em vista diferentes tamanhos de amostra, foi possível verificar que a hipótese H4 foi rejeitada, ou seja, os métodos de modelagem volumétrica individual de árvores apresentaram precisão e exatidão diferentes das estimativas do volume individual de árvores nos diferentes tamanhos de árvores-amostra testados neste estudo. Sendo que, o modelo de regressão ajustado de Schumacher-Hall, com a utilização de no mínimo 75 árvores -amostra, apresenta maior precisão e exatidão para estimar o volume de espécies comerciais.

Contudo, o modelo volumétrico proposto por Schumacher e Hall necessita da altura do fuste, que é uma variável independente, de difícil obtenção no momento do inventário florestal. Desta forma, apesar do modelo de simples estrada de Husch necessitar de no mínimo 150 árvores-amostra, para garantir um modelo com boa precisão e exatidão, esse método passa a ser a alternativa mais prática para ser utilizada no inventário florestal. Futuros estudos que levem em consideração as variáveis categóricas como neorônios da camada de entrada podem ser realizados para testar a eficiência das Redes Neurais Artificiais.