

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/325039323>

PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA BRUTA, RENDIMENTO E MODELAGEM DE MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES COMERCIAIS DA AMAZÔNIA

Thesis · May 2018

DOI: 10.13140/RG.2.2.12699.57124

CITATIONS

0

READS

221

4 authors:



Robson Lima

Universidade do Estado do Amapá

27 PUBLICATIONS 11 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Rinaldo Luiz

Universidade Federal Rural de Pernambuco

233 PUBLICATIONS 1,075 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



José A. Aleixo da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

130 PUBLICATIONS 308 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Marcelino Carneiro Guedes

Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA)

62 PUBLICATIONS 188 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Selênio na castanha-do-brasil e em solos da região Amazônica Brasileira [View project](#)



Responses from tropical rain forests to logging: new perspectives for forest management in the Amazon - GUIAMAFLO [View project](#)

ROBSON BORGES DE LIMA

**PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA BRUTA, RENDIMENTO E MODELAGEM DE
MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES COMERCIAIS DA AMAZÔNIA**

**RECIFE
Pernambuco - Brasil
2017**

ROBSON BORGES DE LIMA

**PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA BRUTA, RENDIMENTO E MODELAGEM DE
MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES COMERCIAIS DA AMAZÔNIA**

Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais, Linha de Pesquisa Biometria e Manejo Florestal

Orientador:

Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira

Co-orientadores:

Prof. Ph.D. José Antônio Aleixo da Silva

Dr. Marcelino Carneiro Guedes

**RECIFE
Pernambuco - Brasil
2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L732p Lima, Robson Borges de
Produção volumétrica bruta, rendimento e modelagem de
madeira serrada de espécies comerciais da Amazônia / Robson
Borges de Lima. – 2017.
142 f. : il.

Orientador: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira.

Coorientadores: José Antônio Aleixo da Silva, Marcelino
Carneiro Guedes.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Florestais, Recife, BR-PE, 2017.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Floresta tropical 2. Manejo floresta 3. Modelos volumétricos
4. Desdobro de madeira 5. Produção florestal I. Ferreira, Rinaldo
Luiz Caraciolo, orient. II. Silva, José Antônio Aleixo da, coorient.
III. Guedes, Marcelino Carneiro, coorient. IV. Título

CDD 634.9

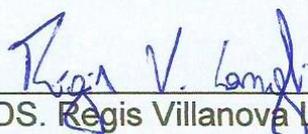
“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que seja para fins acadêmicos ou científicos, e citada a fonte – O autor”

ROBSON BORGES DE LIMA

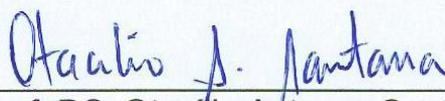
**PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA BRUTA, RENDIMENTO E MODELAGEM DE
MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES COMERCIAIS DA AMAZÔNIA**

APROVADA em 18/12/2017

Banca Examinadora



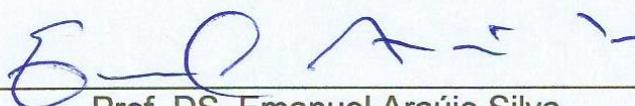
DS. Regis Villanova Longhi
Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde/UFAL



Prof. DS. Otacilio Antunes Santana
Departamento de Biofísica e Radiobiologia/UFPE



Prof. DS. Márcio Vieira da Cunha
Departamento de Zootecnia/UFRPE



Prof. DS. Emanuel Araújo Silva
Departamento de Ciência Florestal/UFRPE

Orientador:



Prof. DS. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira
Departamento de Ciência Florestal/UFRPE

RECIFE-PE
Dezembro/2017

À minha família, em especial ao meu Pai, minha Mãe, Avó e irmãos por todo incentivo, confiança e por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu avô Júlio Bezerra de Lima (*in memoriam*)

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por todos os dias me dar força e saúde para correr atrás dos meus objetivos.

À toda minha família pelo apoio, em especial ao meu pai Laércio Barbosa de Lima, minha mãe Maria da Conceição Baia Borges e minha avó Maria Francisca Barbosa de Lima.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, em especial ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais – PPGCF, que por meio de seus Professores tive a grande oportunidade de aprender e realizar o curso de doutorado.

Ao meu Orientador Professor Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira pela sua orientação, companheirismo, amizade, confiança, pelas excelentes conversas, conselhos e ensinamentos em ciência florestal e por me aceitar mais uma vez como orientando e me ajudar a crescer de forma ética e profissional.

Ao meu Co-orientador Professor Ph.D. José Antônio Aleixo da Silva por todos os ensinamentos em estatística e biometria florestal.

Ao Professor Dr. Marcelino Carneiro Guedes, pelos ensinamentos em manejo florestal na Amazônia, pelo incentivo e companheirismo, pela amizade, ajuda e dedicação.

À Universidade do Estado do Amapá, em especial aos meus amigos professores do colegiado de Engenharia Florestal pelo apoio: Perseu Aparício, Fernando Rabelo, Lina Bufalino, Breno Silva e Francisco Tarcísio Alves Júnior.

À minha noiva Cinthia Oliveira pela paciência e compreensão, carinho e dedicação e por sempre me apoiar nas decisões corretas e por estar em minha vida.

À família Oliveira pelo carinho e apoio em especial à Dona Emília, Seu Antônio, meus aos compadres Rogério Soares e Valéria Soares e minha afilhada Valentina Soares.

Aos amigos e irmãos de pesquisa do Laboratório de Manejo Florestal da Universidade do Estado do Amapá: Diego Armando Silva, Anderson Pedro Batista e Jadson Coelho de Abreu pela amizade e companheirismo de longa data.

Aos meus orientandos e co-orientandos do Laboratório de Manejo Florestal pela ajuda na coleta de dados: Samuel Nahon, Anderson Almeida, Samila Santos, Renan Santos e Erick Patrick.

Aos amigos Pernambucanos da UFRPE do Laboratório de Manejo de Florestas Naturais “José Serafim Feitosa Ferraz” e Laboratório de Biometria e Manejo Florestal em especial a Guera Mariel, pela convivência e troca de experiências.

À grande cidade do Recife em nome das Donas Iraci e Teté pelo acolhimento e por me ajudarem no dia-a-dia desde quando cheguei em 2012.

À todos que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui.

Muito obrigado!

Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.

(Isaac Newton, 1643-1727)

*Uma resposta aproximada para o problema certo vale muito mais do que uma resposta
exata para um problema aproximado*

(John Tukey, 1915-2000)

LIMA, ROBSON BORGES DE. Produção volumétrica bruta, rendimento e modelagem de madeira serrada de espécies comerciais da Amazônia. 2017. Orientador: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira. Coorientadores: José Antônio Aleixo da Silva e Marcelino Carneiro Guedes.

RESUMO

Estimativas precisas da volumetria comercial são indispensáveis para o gerenciamento em planos de manejo em escala empresarial. Nesta tese buscou-se descrever de maneira técnica e objetiva o estado da arte da produção de madeira comercial para fins manejo e serraria. No capítulo 1, buscou-se fornecer alternativas confiáveis para estimar o volume comercial de árvores em diferentes tipologias florestais no Amapá, extremo norte do Brasil. Beneficiando-se de um inventário em larga escala de árvores caídas em todo o estado do Amapá, foram desenvolvidos modelos volumétricos específicos para cada tipo de vegetação bem como uma equação genérica, além de determinação do fator de forma específico para cada área. Após as estimativas de estoque de volume de madeira comercial pelos modelos para cada área, foram realizadas previsões volumétricas empregando as equações genéricas e o fator de forma local para dados do inventário de árvores vivas da Flota com o intuito de avaliar taxas discrepantes de estimação de volume em níveis de área total e tipologia. De modo geral, uma equação genérica para diferentes áreas são fundamentais para nortear a produção de madeira nos planos de manejo na Amazônia. Para alcançar estimativas de volume confiáveis, equações específicas em nível de grupo ecológico, famílias, classes de diâmetro e espécies comerciais são recomendadas considerando diferentes tipologias florestais no Amapá e na Amazônia. O fator de forma superestima a produção volumétrica comercial, não sendo recomendado para as previsões. No capítulo 2, foi realizado um estudo sobre a produção de madeira serrada de espécies comerciais no Amapá. Neste capítulo, o objetivo foi obter e analisar o coeficiente de rendimento volumétrico para dez espécies arbóreas comerciais e testar a variação entre as espécies e por classes de diâmetro. Os dados foram obtidos de uma serraria localizada em Porto Grande, Amapá, onde foram obtidos os volumes, diâmetro e comprimento de 50 toras das espécies: *Carapa guianensis*, *Dinizia excelsa*, *Hymenolobium petraeum*, *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Handroanthus albus*, *Hymenaea courbaril*, *Ocotea rubra*, *Manilkara huberie* e *Vochysia guianensis*. Após o desdobro das toras foi realizada a quantificação dos volumes de madeira serrada e posterior obtenção do coeficiente de rendimento volumétrico. Assim, o rendimento geral obtido para a serraria (43,95%), bem como o rendimento de cada espécie está dentro dos padrões legais estabelecidos para o funcionamento da indústria de acordo com as exigências e normas ambientais. O menor valor obtido foi para a espécie *Carapa guianensis* (37,80%), já *Hymenolobium petraeum* e *Dinizia excelsa* geraram maiores valores de aproveitamento de madeira (54,41% e 54,40% respectivamente). As espécies *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Ocotea rubra* e *Vochysia guianensis* apresentam diferença ($p < 0,05$) de rendimento para as demais espécies devido aos maiores valores obtidos, entretanto

são similares ($p \geq 0,05$) quando comparadas entre si. Não foram verificadas diferenças ($p \geq 0,05$) das classes de diâmetro para as espécies, exceto para *Handroanthus albus* e *Dinizia excelsa*. Entretanto não foi evidenciado incremento linear ($p \geq 0,05$) entre o diâmetro e rendimento de madeira serrada para todas as espécies. No capítulo 3, foi realizada uma abordagem sobre a estimativa do volume de madeira serrada para as espécies comerciais descritas no capítulo anterior. Desta forma, foram geradas equações a partir do ajuste e seleção de 16 modelos estatísticos. Em síntese, estimativas precisas de volume de madeira serrada podem ser obtidas pelo modelo 16 para *C. guianensis*. Para *D. excelsa* e *H. petraeum* os modelos 13 e 15 são os mais recomendados, respectivamente. O modelo 7 apresentou os melhores ajustes para *H. courbaril* e *V. guianensis*. Os modelos 5, 10, 11, 14 e 12 são os mais indicados para *D. odorata*, *G. glabra*, *M. huberi*, *O. rubra* e *H. albus* respectivamente. Equações que utilizam apenas a variável diâmetro da tora sugerem estimativas com menor precisão. Outrossim, deve-se considera o volume da tora como importante variável preditora para obtenção de volume serrado para as diferentes espécies comerciais amazônicas.

Palavras-chave: Floresta tropical. Manejo florestal. Modelos volumétricos. Desdobro de madeira. Produção florestal.

LIMA, ROBSON BORGES DE. Gross volumetric production, yield and modeling of sawn timber from commercial Amazonian species. 2017. Adviser: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira. Comit e: José Ant nio Aleixo da Silva and Marcelino Carneiro Guedes.

ABSTRACT

Accurately estimates of commercial volumetry are indispensable for management in enterprise-scale management plans. In this thesis, we tried to describe in a technical and objective way the state of the art of the production of commercial wood for the production of logs and sawn timber. In Chapter 1, we sought to provide reliable alternatives to estimate the commercial volume of trees in different forest types in Amapá, extreme north of Brazil. Benefiting from a large-scale inventory of fallen trees throughout the state of Amapá, specific volumetric models were developed for each type of vegetation as well as a generic equation, as well as determination of the specific form factor for each area. After estimating the volume of commercial timber by the models for each area, volumetric predictions were made using the generic equations and the local form factor for Fleet live tree inventory data to evaluate discrepant rates of volume estimation in total area and typology levels. In general, equations for different areas are fundamental to guide the production of wood in management plans in the Amazon. To achieve reliable volume estimates, specific equations at the ecological group level, families, diameter classes and commercial species are recommended considering different forest typologies in Amapá and Amazon. The form factor overestimates the commercial volumetric production and is not recommended for the predictions. In the chapter 2, a study was carried out on the production of sawn wood of commercial species in Amapá. In this chapter, the objective was to obtain and analyze the coefficient of volumetric yield for ten commercial tree species and to test the variation among species and by diameter classes. The data were obtained from a sawmill located in Porto Grande, Amapá, where the volumes, diameter and length of 50 logs of the species: *Carapa guianensis*, *Dinizia excelsa*, *Hymenolobium petraeum*, *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Handroanthus albus*, *Hymenaea courbaril*, *Ocotea rubra*, *Manilkara huberi* e *Vochysia guianensis*. After the logs were split, the lumber volumes were quantified, and the volumetric yield coefficient was obtained. Thus, the general yield obtained for the sawmill (43.95%) as well as the yield of each species is within the established standards for the operation of the industry according to the legal requirements. The lowest value was obtained for *Carapa guianensis* (37.80%), while *Hymenolobium petraeum* and *Dinizia excelsa* generated higher values of wood utilization (54.41% and 54.40%, respectively). The species *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Ocotea rubra* and *Vochysia guianensis* show a difference ($p < 0.05$) in yield for the other species due to the higher values obtained, however they are similar ($p \geq 0.05$) when compared to each other. There were no differences ($p \geq 0.05$) in the diameter classes for the species, except for *Handroanthus albus* and *Dinizia excelsa*. However, there was no linear increase ($p \geq 0.05$) between the diameter and yield of sawnwood for all species. In Chapter 3, an approach was taken on the estimated lumber volume for the commercial species described in the previous chapter. In this way, equations were generated from the fit and selection of 16 statistical models. In summary, precise estimates of lumber volume can be obtained by model 16 for *C. guianensis*. For *D. excelsa* and *H. petraeum* the models 13 and 15 are the most recommended, respectively. The model 7 presented the best adjustments for *H. courbaril* and *V. guianensis*. The models 5, 10, 11, 14 and 12 are the most suitable for

D. odorata, *G. glabra*, *M. huberi*, *O. rubra* and *H. albus* respectively. Equations using only the log diameter variable suggest estimates with less precision. Also, the volume of the log should be considered as an important predictor variable for the obtaining of serrated volume for the different Amazonian commercial species.

Sumário

	Páginas
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUÇÃO GERAL	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Floresta Tropical Amazônica.....	16
2.2 Manejo florestal e produção de madeira	21
2.3 A importância de equações de volume na produção de madeira	35
REFERÊNCIAS.....	39
CAPÍTULO 1	53
PRECISÃO NAS ESTIMATIVAS DO VOLUME COMERCIAL EM FLORESTAS TROPICAIS: PREDIÇÕES POR EQUAÇÕES ESPECÍFICAS, GENÉRICAS E FATOR DE FORMA	53
1. INTRODUÇÃO	53
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.1. Área de estudo	54
2.2. Amostragem de árvores caídas e medição de volume comercial do tronco	56
2.3 Desenvolvimento de modelos volumétricos	57
2.4 Tamanho mínimo da amostra para para capturar a heterogeneidade regional	59
2.5 Fator de Forma	59
2.6 Predições volumétricas.....	60
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4. CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS.....	77
CAPÍTULO 2	86
RENDIMENTO VOLUMÉTRICO DE ESPÉCIES COMERCIAIS DA AMAZÔNIA, BRASIL	86
1. INTRODUÇÃO	86
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	88
2.1 Descrição do local de estudo.....	88
2.2 Seleção das espécies, amostragem e coleta de dados	88

2.3 Estimativa do volume de madeira serrada e rendimento volumétrico	91
2.4 Análise estatística	91
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4. CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS.....	103
CAPÍTULO 3	111
MODELAGEM VOLUMÉTRICA DE MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS.....	111
1. INTRODUÇÃO	111
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	112
2.1 Descrição do local de estudo e seleção das espécies.....	112
2.2 Amostragem e coleta de dados	113
2.3 Modelagem estatística	114
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
4. CONCLUSÕES	123
REFERÊNCIAS.....	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
APÊNDICES.....	130

1. INTRODUÇÃO GERAL

A floresta Amazônica é uma das últimas extensões contínuas de floresta tropical úmida da Terra, representando mais de um terço do total (PIRES; PRANCE, 1985; OLIVEIRA; AMARAL, 2004; SOUZA et al., 2014). A Amazônia Legal corresponde a uma área de aproximadamente 5,2 milhões de Km², referentes a 60% território nacional, abrangendo nove Estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e grande parte do Maranhão (LAMPRECHT, 1990). Estima-se existir nessa região entre 55 e 60 mil espécies de plantas superiores, das quais cerca de 5 mil são endêmicas, ou seja, ocorrem somente no Brasil. (VALOIS, 2008; HIGUCHI et al., 2010).

Devido ao grande potencial econômico e ecológico de sua biodiversidade, a floresta Amazônica vem passando por constantes mudanças ocasionadas principalmente pelo desenvolvimento do setor de minas e energia e aumento do mercado madeireiro. Além disso, com a expansão das atividades agropecuárias, nota-se mudanças significativas na geografia da região e grandes áreas de domínios de florestas nativas foram exauridas para a promoção do desenvolvimento e geração de commodities. Muito embora a soma de tais fatores tenha um representativo impacto na economia e geração de emprego e renda na região.

De acordo com Braz et al. (2005), durante muito tempo a floresta tropical úmida foi considerada um obstáculo ao desenvolvimento. Entretanto, nos últimos anos, ela tem sido alvo dos mais diversos interesses, temas e intenções, dentre os quais: madeira, uso múltiplo, baluarte ecológico e biodiversidade. Apesar do atual interesse mundial sobre a floresta tropical, dado o seu imenso potencial, principalmente, em biodiversidade e como mantenedora de importantes sistemas ecológicos, sem esquecer dos possíveis valores econômicos, os governos têm sido impotentes para garantir sua manutenção. Além disso, os debates levantados entre conservacionistas, preservacionistas e outros grupos de interesse geralmente ocorrem de forma polarizada, reduzindo-se a duas questões: o uso exaustivo da floresta ou sua intocabilidade. Neste meio tempo, o interesse imediato do capital tende ainda a desconsiderá-la, tentando outras formas de produção nestas áreas.

Existe um motivo pelo qual o desenvolvimento e aplicação de métodos e práticas sustentáveis de manejo e/ou gestão dos recursos pode contribuir para a manutenção e equilíbrio da biodiversidade, principalmente no que tange a flora da

região. A exploração madeireira é uma atividade econômica sempre crescente na Amazônia brasileira, e tem sido assim ao longo das últimas duas décadas (ALMEIDA et al., 2010a; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014). Visando garantir o uso correto das florestas nativas no que concerne a produção de madeira bruta, o governo brasileiro vem desenvolvendo e aplicando um conjunto de leis, instruções normativas e regulamentos para o setor florestal, podendo-se citar como os principais a atualização do Novo Código Florestal (Lei Nº 12.651/2012), Instrução Normativa nº 05/2006 e a Resolução CONAMA 474/2016 que definem padrões exploração e produção de madeira legal.

Neste sentido, é esperado que a taxa de exploração madeireira na Amazônia brasileira aumente bastante em médio prazo, por causa do tamanho considerável do recurso madeireiro quando comparado com outras florestas tropicais, e porque terão sido consumidas as florestas asiáticas que estão sendo usadas primeiro por causa da qualidade superior da madeira delas (SFB; AMAZON, 2010). A participação do Brasil no volume total de madeira de floresta nativa no comércio internacional era apenas 8% em 1995 e atualmente cominha para o topo da liderança mundial em exportações de madeira serrada (HIGUCHI, 1997; ITTO, 2017).

Desse modo, devido a essa crescente demanda de madeira nobre de espécies comerciais nos últimos anos na Amazônia, a atividade de manejo florestal na região vem ganhando cada vez mais destaque, muito embora a exploração madeireira seja concentrada em áreas menores que 100 hectares e as estimativas de produção média ainda permanecem desconhecida, principalmente em nível de espécie. A exemplo disso, no estado do Amapá, a madeira em tora pode ser proveniente de manejo florestal comunitário ou empresarial, porém os riscos e incertezas das estimativas do volume comercial apresentam uma relação significativa com a falta de informações técnico-científicas e estatísticas para o setor madeireiro. Devido à carência de estudos sobre produção e estimativa volumétrica, tanto na fase de pré-exploratória quanto na fase de desdobro da madeira, os riscos são elevados para o empreendedor, que não tem como estimar com confiança seus custos de produção para a realidade local e o capital necessário para investir no negócio.

O estado do Amapá possui localização estratégica para fortalecer o desenvolvimento da atividade de manejo florestal para produção de madeira visando exportação para os mercados interno e externo. Além disso, suas florestas ainda reportam mais de 70% da cobertura original (RABELO et al., 2008), e são classificadas

em diferentes sítios e tipologias de acordo com as formações geológicas, altitude, e demais fatores florísticos estruturais (IBGE, 2012).

Com o intuito de promover o desenvolvimento sustentável das florestas nativas, grandes parcelas permanentes (IEF, 2017) foram instaladas na região central do Estado do Amapá em 2008 para estimar o potencial produtivo e dar suporte para a criação da primeira floresta pública de produção - Floresta Estadual do Amapá (Lei nº 1.028, de 12 de julho de 2006). Apesar de ser uma área descontínua com mais de dois milhões de hectares, este grande domínio de floresta foi dividido em quatro módulos de produção devido às questões de acesso e infraestrutura. Através do inventário florestal detalhado, estas parcelas têm fornecido, além das descrições mais fiéis de comunidades em diferentes tipologias florestais, tipos de solo e geologia, um banco de dados consistentes da volumetria de árvores (DAP > 10 cm) naturalmente caídas.

Este grande volume de dados gerados, além de permitir descrever a estrutura e dinâmica de populações de muitas espécies (BATISTA et al., 2015), permitem gerar estimativas confiáveis do estoque de volume de madeira comercial, bem como desenvolver modelos volumétricos locais por tipologia e por área total inventariada. Atualmente o estoque de madeira permanece estimado por um fator de forma fixo, sem levar em conta a grande variabilidade das espécies comerciais.

Quando considerada a complexidade e a diversidade das formações florestais naturais, a carência de equações específicas para quantificação do volume das árvores comerciais por tipologia florestal ainda é insipiente (ROLIM et al., 2006; VIBRANS et al., 2016; CYSNEIROS et al., 2017;), uma vez que a heterogeneidade pronunciada na composição de espécies e estruturas, até mesmo dentro de pequenas áreas, constitui um importante desafio no desenvolvimento de equações de volume para florestas tropicais (AKINDELE; LEMAY, 2006; IIDA et al. 2011).

Na ciência florestal é comum o gestor florestal utilizar modelos estatísticos como forma de descrição da estrutura e da produção de seus povoamentos (NASCIMENTO, 2012), principalmente após o segundo ciclo de corte como preceitua a IN 05/2006. Equações geradas com precisão estatística são essenciais para obter previsões e previsões acuradas sobre a floresta, permitindo a tomada de decisão sobre os níveis de gestão florestal (SCHNEIDER et al., 2009; CYSNEIROS et al., 2017). Não menos importante, a precisão na quantificação volumétrica de madeira serrada também é um ponto chave na estruturação da produção, pois além de permitir

inferências sobre a quantidade produtos gerados pelo volume comercial da tora, permite também as estimativas do valor monetário das florestas (CLUTTER et al. 1983).

A abordagem sobre a seleção de modelos estatísticos, embora não seja uma tarefa trivial, é fundamental para a tomada de decisão de forma mais criteriosa. Em estatística, fazer inferência a partir de uma equação gerada de um modelo significa tirar suposições e/ou conclusões sobre uma população conhecendo apenas uma parte dela (amostras ou conjuntos de dados), sendo esse todo governado por variações aleatórias (LIMA et al., 2014; LIMA et al., 2017).

Assim, a quantificação volumétrica por meio de equações é um ponto fundamental para atender os aspectos legais concernentes ao manejo florestal, constituindo a principal ferramenta de planejamento, pois, além de dimensionar o estoque e a produtividade da floresta, gera informações que irão direcionar a atividade de colheita, abastecimento de madeira em tora, estimação de madeira serrada (HIRAMATSU, 2008, CYSNEIROS et al. 2017).

Diante desse contexto, o objetivo geral desse estudo é gerar estimativas precisas da produção volumétrica de madeira comercial e análise da produção de madeira serrada, como subsídios para o manejo florestal sustentável no Amapá.

Os objetivos específicos são:

- Ajustar modelos estatísticos para determinação de equações volume para o Amapá e comparar as estimativas com as predições geradas pelo fator de forma.
- Determinar coeficiente de rendimento volumétrico para as principais espécies comerciais no Amapá e verificar a variabilidade de aproveitamento de madeira serrada por espécie e por classe de diâmetro.
- Determinar equações para a estimativa de volume de madeira serrada para as principais espécies comerciais da região.

2. REVISÃO DE LITERATURA

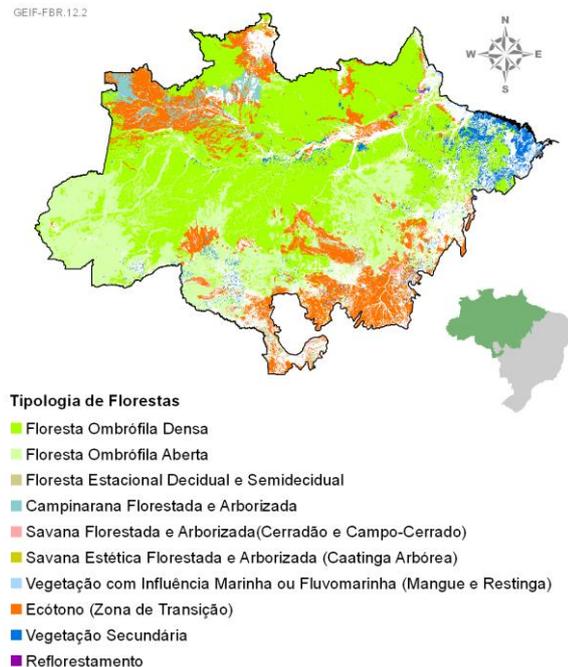
2.1 Floresta Tropical Amazônica

A constituição brasileira em seu Capítulo VI – do Meio Ambiente, Art. 225, § 4º considera o bioma floresta amazônica brasileira como patrimônio nacional (BRASIL, 1988). No Art. 1º do Código Florestal Lei nº 12.727/2012, as florestas são consideradas bens de interesse comum a todos os habitantes do país. Isso mostra a importância que os recursos florestais têm para a humanidade e a responsabilidade que todos nós temos ao utilizá-los (BRASIL, 2012). Entretanto, as estatísticas oficiais demonstram que ainda há uma grande distância entre os dispositivos legais e a prática da proteção da floresta amazônica. Segundo o INPE (2017) a Amazônia Legal perdeu entre 2004 e 2017 mais de 14% (mais de 70 milhões de hectares) de sua cobertura original. A média anual de área desmatada baseada na série histórica 1988 a 2017 foi de 17.579 km² ± 2.144 km² (IC 95%). Isto representa emissão de mais de 220 milhões de toneladas métricas de carbono por ano ou, aproximadamente, 2/3 das emissões nacionais (MCT, 2004).

O relevo da Amazônia é formado por planaltos, planícies e depressões, não apresentando altitudes superiores a 200m, que se estende entre os escudos cristalinos do Centro Oeste brasileiro e o escudo das Guianas (Ab'SABER, 1998, 2001, 2002, 2003; RAMOS; AZEVEDO, 2009). Os solos não possuem uma fertilidade natural muito grande, pois são formados de rochas sedimentares. Desta maneira, existe uma *ciclagem natural de nutrientes*, que são originados pela própria biota local, ou seja, a matéria orgânica existente no solo é originada pelos restos vegetais/animais que se formam no local pelos seres decompositores. Portanto quando ocorre um desmatamento, o solo fica fértil por apenas um curto período, até esta matéria orgânica cessar e deixar o solo extremamente pobre (EMBRAPA, 2006).

Dentre as principais categorias de florestas sob o domínio morfoclimático amazônico, têm-se: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Decidual e Semidecidual e domínios de campos abertos e cerrados (MMA, 2007; SFB, 2010; IBGE, 2012) (Figura 1).

Figura 1. Florestas do Bioma Amazônia. Fonte: MMA (2007)



Fonte dos Dados: MMA (2007).

De acordo com dados do IBGE (2012), o termo Floresta Ombrófila Densa, criado por Ellenberg e Mueller-Dombois (1967), substitui Pluvial (de origem latina) por Ombrófila (de origem grega), ambos com o mesmo significado “amigo das chuvas”. Além disso, esses autores empregaram pela primeira vez os termos Densa e Aberta como divisão das florestas dentro do espaço intertropical, muito embora este tipo de vegetação seja conhecido também pelo nome original dado por Schimper (1908) e reafirmado por Richards (1996) de “Floresta Tropical Pluvial”.

A designação de Ellenberg e Mueller-Dombois (1967) foi aceita porque as duas fisionomias ecológicas ocorrem tanto na Amazônia como nas áreas costeiras, justificando-se assim o uso da terminologia mais recente. Este tipo de vegetação é caracterizado por fanerófitos - subformas de vida macro e mesofanerófitos, além de lianas lenhosas e epífitas em abundância, que o diferenciam das outras classes de formações. Porém, sua característica ecológica principal reside nos ambientes ombrófilos que marcam muito a “região florística florestal”. Assim, a característica ombrotérmica da Floresta Ombrófila Densa está presa a fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (médias de 25 °C) e de alta precipitação, bem distribuída durante o ano (de 0 a 60 dias secos), o que determina uma situação bioecológica praticamente sem período biologicamente seco.

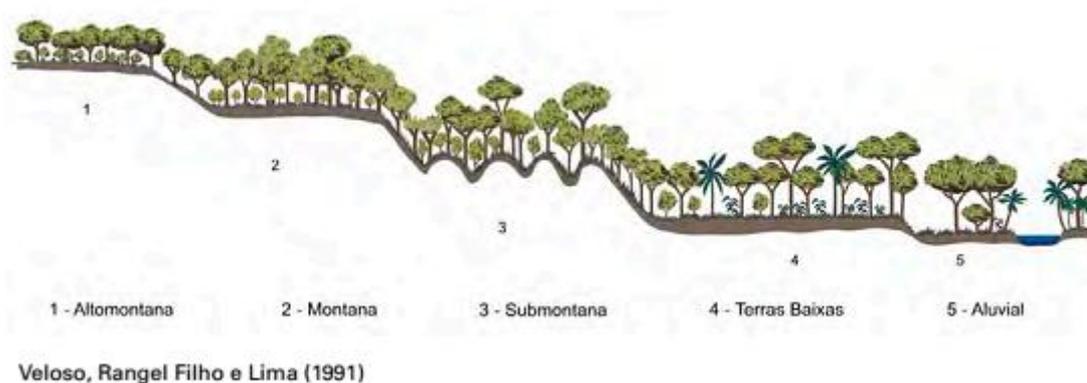
O tipo vegetacional Floresta Ombrófila Densa foi subdividido em cinco formações, ordenadas segundo a hierarquia topográfica, que condiciona fisionomias diferentes, de acordo com as variações das faixas altimétricas. Para cada 100 m de altitude as temperaturas diminuem 1° C.

1° Ao nível do mar a temperatura varia 2 °C a cada 10° de latitude e vai diminuindo com maior intensidade na zona subtropical (TROJER, 1959).

2° O gradiente vertical varia 1° C para cada 100 m de altitude, porém este gradiente é bem maior nas latitudes maiores.

As observações realizadas, durante os levantamentos executados pelo Projeto Radambrasil, nas décadas de 1970 e 1980, e os estudos fitogeográficos mundiais, iniciados por Humboldt, em 1806, na ilha de Tenerife e contidos em vasta bibliografia, permitiram o estabelecimento de faixas altimétricas variáveis, conforme as latitudes, que se estreitavam de acordo com os seguintes posicionamentos (Figura 2).

Figura 2. Perfil esquemático da Floresta Ombrófila Densa. Fonte: IBGE (2012).



Formação Aluvial - não condicionada topograficamente e apresenta sempre os ambientes repetitivos, dentro dos terraços aluviais dos flúvios;

Formação das Terras Baixas – situada em áreas de terrenos sedimentares do terciário/quaternário – terraços, planícies e depressões aplanadas não susceptíveis a inundações - entre 4° de latitude Norte e 16° de latitude Sul, a partir dos 5 m até em torno de 100 m acima do mar; de 16° de latitude Sul a 24° de latitude Sul de 5 m até em torno de 50 m; de 24° de latitude Sul a 32° de latitude Sul de 5 m até em torno de 30 m;

Formação Submontana - situada nas encostas dos planaltos e/ou serras, entre 4° de latitude Norte e 16° de latitude Sul, a partir de 100 m até em torno dos 600

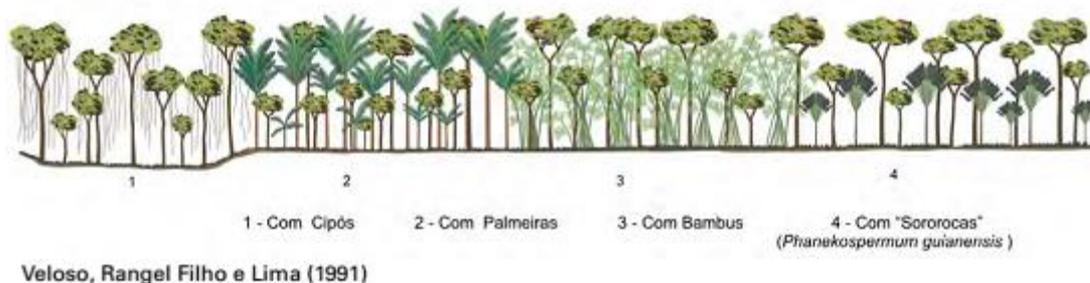
m; de 16° de latitude Sul a 24° de latitude Sul, de 50 m até em torno de 500 m; de 24° de latitude Sul a 32° de latitude Sul, de 30 m até em torno de 400 m;

Formação Montana - situada no alto dos planaltos e/ou serras, entre os 4° de latitude Norte e os 16° de latitude Sul, a partir de 600 m até em torno dos 2000 m; de 16° de latitude Sul a 24° de latitude Sul, de 500 m até em torno de 1 500 m; de 24° de latitude Sul até 32° de latitude Sul, de 400 m até em torno de 1000 m; e

Formação Alto-Montana - situada acima dos limites estabelecidos para a formação Montana.

A segunda maior formação florestal é dominada por Floresta Ombrófila Aberta, que de acordo com IBGE (2012), este tipo de vegetação é considerado um tipo de transição entre a Floresta Amazônica e as áreas extra-amazônicas, e foi denominado pelo Projeto Radam Brasil (VELOSO et al., 1975) de Floresta Ombrófila Aberta. Apresenta quatro faciações florísticas que alteram a fisionomia ecológica da Floresta Ombrófila Densa, imprimindo-lhe claros, daí advindo o nome adotado, além dos gradientes climáticos com mais de 60 dias secos por ano, assinalados na curva ombrotérmica (Figura 3).

Figura 3. Perfil esquemático das fácies da Floresta Ombrófila Aberta. Fonte: IBGE (2012).



Categoricamente, essa formação florestal se subdivide em fisionomias específicas, considerando as abrangências específicas de relevo, solo, temperatura e precipitação, cuja variação dessas características muito embora seja pouco diferente das Floresta Ombrófila Densa. A faciação denominada floresta com cipó pode, nas depressões circulares do embasamento pré-cambriano, ser considerada como “floresta-de-cipó”, tal a quantidade de plantas sarmentosas que envolvem os poucos indivíduos de grande porte da comunidade, transformando-os no que a literatura considera *Climbertowers*- torres folhosas ou torres de cipó. Esta mesma faciação apresenta nas encostas dissecadas outro aspecto de comunidade aberta, devido ao

emaranhado de lianas em todos os estratos da floresta com cipó, que dificulta sobremaneira a interferência humana. Afaciação provocada pela *Phenakospermum guyannense* (A. Rich.) Endl. ex Miq., sororoca (Strelitziaceae), foi observada na área sul da Bacia Amazônica, formando grandes agrupamentos nas depressões temporariamente inundadas e rasas, localizadas no Médio Rio Xingu. No restante da Amazônia, onde ocorre preferencialmente em relevo ondulado e sobre Latossolos, constitui pequenos agrupamentos não mapeáveis em escalas regional e exploratória (VELOSO, 1991; IBGE, 2012).

Ainda seguindo a categorização realizada por Veloso (1991) e IBGE (2012), têm-se:

Floresta Ombrófila Aberta Aluvial - Formação estabelecida ao longo dos cursos de água, ocupa as planícies e terraços periodicamente ou permanentemente inundados, que na Amazônia constituem fisionomias de matas-de-várzea ou matas-de-igapó, respectivamente. Tem composição florística e características ecológicas predominantes, semelhantes às da Floresta Ombrófila Densa Aluvial, apenas na fisionomia destaca-se por apresentar muitas palmeiras de grande porte que, não raro, formam gregarismos. Às vezes destaca-se, também, pela dominância de lianas lenhosas e herbáceas, cobrindo um rarefeito estrato de árvores.

Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas - Esta formação, em altitudes que variam de 5 até 100 m, apresenta predominância da faciação compalmeiras. Esta formação foi submetida à intensa devastação florestal, causada pela expansão das fronteiras agrícolas. Aos poucos foi substituída pelo adensamento da *Attalea speciosa* Mart. ex Spreng. (Babaçu), originando o “babaçual” que domina inteiramente a paisagem e faz parte da vegetação secundária. É também encontrada em estado natural, mas, no caso, em associação com outras *angiospermae*.

Floresta Ombrófila Aberta Submontana - Esta formação pode ser observada distribuída por toda a Amazônia e mesmo fora dela principalmente com a faciação floresta com palmeiras. Na Amazônia, ocorrem as quatro faciações florísticas (com palmeiras, com cipó, com sororoca e com bambu) entre 4° de latitude Norte e 16° de latitude Sul, situadas acima de 100 m de altitude e não raras vezes chegando a cerca de 600 m. Com o advento das imagens de radar, os técnicos do Projeto Radam Brasil puderam delimitar aproximadamente as grandes áreas da floresta com bambu e determinar sua importância, incluindo-a como mais uma “faciação florística da floresta aberta” nos Estados do Acre e do Amazonas.

2.2 Manejo florestal e produção de madeira

Desde o início da engenharia florestal como ciência até os dias de hoje, a descrição dos conceitos de sustentabilidade e produção contínua de bens e serviços é uma das abordagens mais tradicionais nos estudos em florestas nativas, sendo amplamente documentada no livro de Hans Carl von Carlowitz (1713). No seu livro “Silvicultura econômica” de 1713, Hans Carl von Carlowitz pergunta-se “(...) *wie eine sothan Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen daß es eine continuirliche beständige und nachhaltende Nutzung gebe (1713)*”, que quer dizer: “Como conseguir a conservação e o cultivo do bosque, para que tenha um aproveitamento contínuo e sustentável” (SERAFIM, 2016). Von Carlowitz propôs cortar somente tantas árvores quanto poderiam voltar a crescer através do reflorestamento planejado, semeando e plantando novamente. A palavra alemã “nachhaltend” foi traduzida para o inglês como “sustainable” e para o português como “sustentável” (SERAFIM, 2016). Vale salientar que Carlowitz foi o primeiro a relacionar sustentável com um pensamento de responsabilidade para as gerações futuras (SERAFIM, 2016).

Quando o manejo florestal foi adotado na Europa, ele se restringia apenas às práticas silviculturais, que eram aplicadas aos povoamentos com o objetivo de produzir madeira, constituindo-se assim numa forma de ordenamento florestal, visando apenas a obtenção de um produto. Com o passar dos anos, valores foram sendo agregados a esse ordenamento, os quais se definiam como: econômicos, informativos, estruturais e tecnológicos, transformando-se na maneira de manejar suas florestas para atingir os objetivos desejados, surgindo assim o manejo florestal sustentável (ZACHOW, 1998).

Zachow (1998) também afirma que com o desenvolvimento de sistemas silviculturais no velho continente, o manejo florestal foi adaptado ao ordenamento das florestas tropicais na Ásia por silvicultores europeus e trazido para a América por volta de 1940. O conjunto das atividades de silvicultura, ordenamento, economia florestal, teoria geral da administração, técnicas de mensuração e exploração florestal, associada como desenvolvimento das tecnologias de produtos florestais e as privações legislativas aplicadas, acabou por consolidar o manejo florestal sustentável.

O conceito de manejo florestal adotado por Higuchi (2008) é a parte da ciência florestal que trata do conjunto de princípios, técnicas e normas que têm por fim organizadas ações necessárias para ordenar os fatores de produção e controlar a sua

produtividade e eficiência, para alcançar definidos objetivos. Assim, a condução de um povoamento florestal aproveita apenas aquilo que ele é capaz de produzir, ao longo de um determinado período, sem comprometer a sua estrutura natural e o seu capital inicial.

O manejo florestal, como definido no Decreto nº 2 1.282/95, que regulamentou a exploração das florestas da Amazônia, é a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos e sociais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema.

Campos e Leite (2009), conceituam o manejo como sendo o estudo, o desenvolvimento e a aplicação de técnicas de análise quantitativa nas decisões acerca da localização, da estrutura e da composição de recurso florestal, de modo a possibilitar a geração de produtos, serviços e benefícios, diretos e/ou indiretos, na quantidade e na qualidade requeridas por uma organização ou por toda a sociedade. Esses mesmos autores concordam que os métodos silviculturais são seqüências de operações técnicas para condução de um povoamento, enquanto os sistemas silviculturais consideram, além da técnica em si, a cultura e a disposição de aplicação dos métodos por uma comunidade humana. Exemplo clássico é o sistema de “roço de toco” ou *shifting cultivation*, típico dos índios e caboclos brasileiros nas regiões tropicais.

Historicamente, segundo Clutter et al. (1983), Buongiorno e Gilles (2003), Davis et al. (2005) e Bettinger et al. (2009), quatro pontos fundamentam as discussões acerca do conceito de “florestas sustentáveis”. Um atributo muito importante ao manejador florestal é conseguir elucidar e compreender cada um desses pontos e, de forma convincente, ser capaz de explicar suas diferenças (MEDEIROS, 2008; SOUZA et al., 2014). A seguir, de acordo com os autores supracitados, cada um destes pontos é resumidamente apresentado.

1. *Fluxo contínuo da produção madeireira*: A empresa florestal deve buscar em suas atividades um fornecimento contínuo dos produtos oriundos da madeira de árvores, principalmente a fim de suprir as suas próprias demandas. Este fluxo contínuo de produtos é sustentável quando a colheita não ultrapassar o limite de produção, ou crescimento particular daquela floresta.

2. *Produção sustentável e uso múltiplo*: As florestas podem oferecer muito mais do que uma produção sustentável de madeira, servindo de área de recreação e lazer, como áreas para pesca e turismo ecológico. As florestas mantêm a qualidade de vida,

ao oferecer melhores condições climáticas e ambientais, bem como propiciam condições necessárias à qualidade da água essencial para o consumo humano e de outros seres vivos.

3. *Ecosistemas florestais naturais*: Discute-se cada vez mais a posição de que certas áreas de florestas deveriam ter sua beleza preservada, a fim de manter suas relações e seus processos naturais sem a interferência humana. Uma solução é a criação de extensas áreas de reservas ou parques naturais, que permitirão a existência de áreas sem significativa intrusão humana, o que protegerá espécies de larga escala de ocorrência, fornecerá exemplos de processos naturais e servirá como alternativa ao uso intensivo dos recursos florestais. Nesses sistemas naturais admite-se somente a presença do homem, no que se refere às populações tradicionais de *Homo sapiens*, como indígenas, quilombolas, caiçaras, pescadores, populações ribeirinhas, comunidades extrativistas, entre outros.

4. *Manejo florestal sustentável*: busca-se reunir as abordagens anteriores de forma harmoniosa e compatível com o ecossistema em questão. Uma ideia importante no manejo diz respeito às relações de coexistência entre homem e natureza, ou seja, o reconhecimento das populações humanas que se desenvolvem dentro ou muito perto da floresta, o que de certa forma afeta o desenvolvimento dessa floresta. Inclui-se aqui também pela utilidade da floresta em relação à produtividade, todavia tem-se a pretensão de restabelecer e proteger estruturas, funções e processos em ecossistemas críticos através de projetos de longa duração. Enfim, agrega-se ao objetivo único de uma produção contínua de madeira do manejo tradicional a proposta de manejar o sistema florestal com um todo em busca de múltiplos propósitos.

Pode-se diferenciar dois grandes grupos de métodos, em função da extração ocorrer completamente em um único momento ou em curto período de tempo, denominado método monocíclico, ou na ocorrência de exploração parcial, mantendo-se um estoque de árvores mais jovens, em crescimento, para a próxima colheita, denominado método policíclico. Nos grupos monocíclicos, a composição etária é equiânea e a rotação das colheitas tende a ser longa (70 a 100 anos), dependendo da velocidade de crescimento da regeneração proveniente da exploração anterior, e as espécies cultivadas são preponderantemente demandantes de luz (SCOLFORO, 1998; MATSUNAGA, 2005).

Da categoria monocíclica, faz parte a coleção de métodos silviculturais, entre os quais se ressaltam o corte raso, os cortes progressivos, o uniforme malaio e o de

talhadia. Os monocíclicos são variações locais, motivadas por específicas características fitossociológicas e estruturais das florestas, derivados dos clássicos métodos de seleção e de melhoramento. Nos grupos policíclicos, os povoamentos são dissetâneos, os ciclos de corte são mais curtos (20-30 anos) e é possível cultivar espécies dos mais variados comportamentos ecofisiológicos e, mantendo-se, conseqüentemente, ampla biodiversidade. Exemplos típicos deste sistema são: o sistema seletivo, da Indonésia, o sistema de seleção de Gana e o sistema celos, do Suriname (LAMPRECHT, 1990; MATSUNAGA, 2005; HIGUCHI et al., 2008).

O plano de manejo florestal tem por objetivo conciliar o fornecimento contínuo de matéria-prima para uma empresa florestal, conduzindo a floresta de acordo com sua capacidade de produção e reconstituição, sem promover a degradação da estrutura vegetal existente e sem causar impactos significativos ao ambiente e à sociedade onde se localiza a empresa e à área a ser manejada (STCP, 1994). Segundo a ITTO (2009) e FAO (2010), a seleção dos objetivos dos planos de manejo deve ser encarada seguindo quatro pontos: (a) fatores físicos, biológicos, ecológicos e ambientais; (b) fatores sociais, incluindo os aspectos políticos e culturais, as necessidades básicas da comunidade, e satisfazer a demanda em níveis local e nacional; (c) fatores econômicos, incluindo as limitantes financeiras e orçamentais, as taxas de rendimento, os custos e os preços, o comércio e o mercado; e (d) fatores tecnológicos e as suas evoluções prováveis nos domínios da silvicultura, da extração e da transformação da madeira.

Com isto, os objetivos do manejo florestal ficam caracterizados como um sistema orientado por metas bem definidas, condicionadas por um certo número de limitantes e alimentado por novas informações. De maneira técnica, os objetivos do manejo obedecem às seguintes razões: (i) a continuidade da produção; (ii) a rentabilidade; (iii) a segurança de trabalho; (iv) o respeito à lei; (v) as oportunidades de mercado; (vi) a conservação florestal; e (vii) os serviços ambientais (VERÍSSIMO et al., 1998). Para que as elas tenham seu êxito, é necessário que haja uma responsabilidade integrada entre os empresários do setor e os técnicos responsáveis pela elaboração e execução das atividades previstas nos planos de manejo florestal (MATSUNAGA, 2005).

O mercado madeireiro é uma das alternativas para o desenvolvimento da região amazônica (ALMEIDA et al., 2010a). A Amazônia é uma das principais regiões

produtoras de madeira tropical no mundo atrás apenas da Malásia e Indonésia (OIMT, 2012).

O manejo é essencial para que a exploração madeireira possa gerar renda e benefícios para a população local, fortalecendo a economia florestal para promoção do desenvolvimento. Entende-se como manejo florestal, o conjunto de técnicas para o gerenciamento da floresta visando a produção sustentada de bens e serviços para a sociedade de forma perpétua. Este conceito varia de acordo com as literaturas da ciência florestal, porém é fartamente documentado (CLUTTER et al., 1983; DYKSTRA, 1984; LEUSCHNER, 1984; 1990; VANCLAY, 1994; BUONGIORNO; GILLESS, 2003; SCOLFORO, 2006; DAVIS et al., 2005; BETTINGER et al., 2009; CAMPOS; LEITE, 2013).

De forma sintetizada, estudos sobre ecologia, manejo florestal, economia e política do setor madeireiro da região podem ser encontrados nas publicações do Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia - IMAZON (SMERALDI; VERÍSSIMO, 1999; BERGER et al., 2002; HOLMES et al., 2002; VIDAL et al., 2002; ARIMA et al., 2002; ARIMA; VERÍSSIMO, 2002; VERÍSSIMO et al., 2002; SOBRAL et al., 2002; SABOGAL et al., 2006). Mais especificamente sobre produção de madeira no Estado do Amapá, pode-se citar uma abordagem sobre a ótica de sustentabilidade desta atividade em Veríssimo e Lima (1999).

Em muitos casos na Amazônia Legal, a exploração das florestas é predatória, cujo principal objetivo é a máxima produção de madeira sem estabelecer critérios técnicos de sustentação do ecossistema, que somado à expansão das fronteiras agrícolas, têm contribuído para o aumento do desmatamento.

Em escala empresarial, algumas dificuldades enfrentadas para a efetiva implantação de um plano de manejo florestal estão relacionadas à necessidade de alto investimento inicial, à burocracia dos órgãos reguladores, à concorrência desleal com madeiras clandestinas e à falta de segurança fundiária na região amazônica (SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014).

No entanto, para atenuar o problema de abastecimento de madeira nos mercados para a exportação (onde o retorno financeiro é maior), o plano de manejo deve ser viável economicamente, buscar a certificação de seus produtos e atender o planejamento dentro do prazo de execução e todos os requisitos da legislação vigente.

Para a melhoria na elaboração dos planos de manejo, algumas informações no âmbito econômico social são necessárias. Na pesquisa de Santana et al. (2012), foi

ressaltado a importância do dimensionamento do valor econômico da floresta manejada e sua comparação com as principais alternativas de uso da terra na Amazônia (pecuária extensiva e agricultura de grãos) revelando resultados que confirmam a hipótese de que a exploração sustentável da floresta é mais rentável do que as atividades agropecuárias que, para serem implantadas, exigem a retirada da floresta.

Para as empresas verticalizadas que gerenciam grandes extensões de florestas naturais na Amazônia, a atividade de manejo florestal será vantajosa se a receita obtida a partir do produto final compensar os custos despendidos na elaboração e execução das atividades de pré e pós-exploração e também o processamento da matéria-prima. Desta maneira, as estimativas confiáveis da produção e estoque de madeira em volume é um elemento-chave para o desenvolvimento de projetos florestais a longo prazo (ALMEIDA et al., 2010b). Além disso, as pesquisas sobre estimativas confiáveis de produção de madeira para os planos de manejo são fundamentais para assegurar uma produção contínua de bens e serviços, nortear o desenvolvimento de metodologias mitigadoras para aumentar a remuneração de capital, minimizar custos e reduzir impactos ambientais.

Considerando uma área de 250 milhões de hectares em florestas produtivas na Amazônia, com um volume médio de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, sendo 10% destes com valor comercial, Clement e Higuchi (2006) estimaram o estoque de madeira comercial (CTS) em 6,25 bilhões de m^3 . Segundo os autores, como a demanda de madeira tropical internacional gira em torno dos 52 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, e a nacional em torno dos 20 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, o estoque nacional dessa floresta supriria esses mercados ininterruptamente por 87 anos, movimentando cerca de US\$ 22 bilhões por ano. Se ela crescer $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{há}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, com um ciclo de corte de 50 anos, seria repostado todo o estoque colhido.

Segundo Azevedo (2006), há uma rica discussão entre pesquisadores, tomadores de decisão, agentes econômicos, lideranças sociais, organizações ambientais e governo sobre o futuro da floresta Amazônica, onde se tem reconhecimento unânime sobre a vocação florestal da região. Essas argumentações consideram, deste modo, viável a possibilidade de assegurar o desenvolvimento da região amazônica a partir da produção sustentável de madeira e ainda garantir a conservação deste imenso patrimônio natural.

A região da Ásia e do Pacífico, mesmo com tendência de queda, foi a maior produtora de madeira dura tropical entre de 1988 e 2004, com 67%, enquanto a América Latina e o Caribe, juntos, perfizeram 20% e todo o continente africano apenas 8%. Os maiores produtores individuais no período foram a Indonésia, com 66,14 milhões de $\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$ (27%); a Malásia, com 52,17 milhões de $\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$ (21%); e o Brasil, com 48,60 milhões de $\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$ (20%). Em termos mundiais, existe tendência de queda na produção dos países asiáticos e aumento na produção e exportação nacional (CLEMENT; HIGUCHI, 2006; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014).

Para que a floresta Amazônica não siga a mesma tendência de exploração que as florestas de Dipterocarpaceas do sudeste asiático, que se encontram praticamente exauridas, e da floresta Atlântica, primeira floresta a ser explorada no Brasil, da qual resta atualmente em torno de 7% de sua área total, é fundamental que os atores econômicos e governamentais não assumam a posição de que a abundância deste recurso o torna infinito, sendo a aplicação de técnicas de manejo florestal sustentável uma alternativa viável pela vocação da região amazônica para produção florestal, em vistas a outras formas de uso do solo. Assim, praticar o manejo florestal sustentável requer o conhecimento adequado da área de floresta que se pretende explorar. A legislação pertinente ao uso de recursos florestais na Amazônia se inicia com a exigência legal de somente explorar esses recursos mediante um plano técnico de condução e manejo que consta no artigo 15 da Lei n. 12651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012).

Atualmente em vigência, a Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006), explicita as formas de manejo passíveis de serem praticadas nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, dispondo sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) na região. Dentre os procedimentos técnicos exigidos está o inventário de prospecção a 100%, ou censo, que consiste na enumeração completa e no mapeamento dos indivíduos arbóreos com características comerciais, que servirá de base para determinar a intensidade de corte e os tratamentos silviculturais, entre outras informações. E para avaliar o crescimento da floresta explorada, é obrigatório o monitoramento através de um inventário florestal contínuo, sendo lançadas parcelas permanentes na floresta a ser manejada, a fim de determinar com precisão o ciclo de corte ideal para o

compartimento de floresta manejado, com base no crescimento fidedigno das espécies de valor comercial, por exemplo.

Com relação à produção de madeiras tropicais, o Brasil processa 25 milhões de metros cúbicos de toras e produz 11,2 milhões de metros cúbicos de madeiras serradas, dos quais consome 10,5 milhões, colocando-se, portanto, na liderança mundial de produção e consumo no setor (FAO, 2010). Quanto à indústria de processamento de madeiras tropicais, é bem provável que em nenhum lugar do mundo, a indústria madeireira tenha crescido tanto quanto na região amazônica brasileira. Em 1956, somente 89 serrarias eram conhecidas na região; em 1989, este número atingiu a cifra de 2.892 (ÂNGELO; SILVA, 1998). Atualmente, devido ao controle e fiscalização de órgãos ambientais ainda existem pouco mais de 2.000 serrarias na região (SFB; AMAZON, 2010). Muitas dessas serrarias são pequenas e rudimentares e operam com produção menor do que $5.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$. Até meados dos anos 90, cerca de 160 indústrias produziam mais de 10.000 m^3 de madeira serrada. Veríssimo e Lima (1999) estimaram em 2311 o número de serrarias na Amazônia. A indústria madeireira na região está associada à oferta abundante de madeira de diversas espécies. Com as dificuldades cada vez maiores de se conseguir matéria-prima florestal, várias indústrias deixam de operar ou migram para novas fronteiras, o que caracteriza o perfil extrativista de um porcentual expressivo deste setor.

A exemplo disso, a evolução da indústria madeireira em Mato Grosso teve uma época expressiva; de 1970 a 1997, o número de empresas passou de 99 para 860 (VERÍSSIMO; LIMA, 1999), o que colocou o Estado na liderança do quantitativo de empresas madeireiras na Amazônia. Entretanto, até 2009, o estado do Pará já era o líder da região, com cerca de 1.067 serrarias, com produção total de 6.599 metros de madeira em tora e 2.550 m^3 de madeira processada (SFB; AMAZON, 2010). Devido a escassez da matéria-prima florestal em várias regiões da Amazônia, empresários buscam alternativas para manter suas atividades, seja por meio de adoção de técnicas de manejo florestal, seja por meio de reflorestamento com espécies potenciais para a região, entre as quais se destacam a teca (*Tectona grandis* L); o mogno, *Swietenia macrophylla* King; o pinho-cuiabano, *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke; e outras.

Outros fatores influenciam na irregularidade na produção de madeira na Amazônia, destacando-se os custos do transporte, a carência de pesquisa e de informações técnicas, o baixo nível tecnológico da indústria, o pequeno número de

espécies utilizadas, a falta de linhas de crédito para produção e o descompasso entre as atividades produtivas e os organismos oficiais normativos. Todos estes fatores afetam a oferta de produtos madeireiros nos mercados interno e externo (JOHNS et al., 1996; JOHNS, 1997; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014).

O mercado mundial da madeira regularmente passa por mudanças profundas, nas quais restringem a competitividade dos países produtores de madeira tropical (ALMEIDA et al., 2010; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014). Essas mudanças emergem de quatro áreas de transição e têm influenciado o setor florestal nos diversos países, de forma gradual: a) transição no manejo florestal: da floresta nativa à floresta manejada e à plantação; b) transição na área florestada: do declínio à expansão da área florestada; c) paradigmas florestais: da floresta pré-industrial à floresta industrial e pós-industrial; e d) integração global: um sistema global de recursos florestais e uma transição industrial de norte a sul. Assim, essas mudanças também convergem ou se complementam e, às vezes, são contraditórias.

Desde a década de 1980, as indústrias madeireiras na Amazônia vêm passando por um processo de concentração, acompanhado pela criação de uma rede internacional de localidades de produção e processamento de madeira dentro das grandes companhias transnacionais (ALMEIDA et al., 2010; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014). Esta concentração propicia inovações tecnológicas, que não só possibilitaram esse processo, como também “libertaram” a indústria madeireira da dependência de recursos florestais nativos e incentivaram a internacionalização através da integração vertical entre a produção e o processamento, que se transformou em um fator central de competitividade. Além disto, a integração vertical, ou seja, o estabelecimento de plantações e os investimentos em novos equipamentos de produção, requerem grandes somas de capital, inacessíveis para empresas de pequeno e médio porte. Assim, de acordo com Arima (2002), considerando o importante papel do Brasil no mercado de madeiras tropicais e as transformações vividas no setor industrial madeireiro, que se somam às questões ambientais, torna-se necessário conhecer melhor a indústria de beneficiamento de madeira tropical e seus efeitos sobre a Floresta Amazônica.

O conhecimento da indústria de madeiras tropicais é de suma importância para responder a uma série de questionamentos na formulação de políticas de uso racional dos recursos florestais na Amazônia brasileira (HOLMES et al., 2002; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014).

Durante os últimos vinte e cinco anos, a Amazônia tem-se tornado a maior região produtora de madeira processada Brasil. Grande parte desse crescimento ocorre no Estado do Pará. Por exemplo, na região de Paragominas, o número de empresas madeireiras aumentou de 2, com uma produção total de madeira processada de 8.600 m³ em 1970, para 1.067 empresas com uma produção total de mais de 6,599 milhões de m³ em 2009 (VERÍSSIMO et al., 1992; SFB; IMAZON, 2010). Uma produção de madeira processada dessa magnitude consome aproximadamente 3,4 milhões de m³ de madeira em tora (rendimento médio de 35%). No entanto, para que a indústria madeireira continue a desempenhar um papel significativo na economia da região, as florestas devem ser manejadas a fim de garantir uma fonte sustentável de madeira no futuro (BARRETO et al., 1998).

O manejo dos recursos florestais não está restrito à floresta. A eficiência no desdobro das toras em produtos (madeira serrada, lâminas, compensados etc.) pode afetar significativamente a área de floresta necessária para satisfazer a demanda por madeira processada. Em uma serraria piloto em Santarém, Pará, atingiu-se um rendimento superior a 60% para algumas espécies da região (SUDAM, 1981). Entretanto, com base em entrevistas com proprietários de empresas madeireiras na Amazônia, as estimativas do rendimento foram de aproximadamente 40% (UHL; KAUFFMAN, 1990; VERÍSSIMO et al., 1996). A diferença entre essas estimativas de rendimento potencial e real sugere que existem oportunidades para reduzir o desperdício de madeira associado ao processamento.

A Serraria, ou indústria de processamento de madeira em tora, é o local onde toras são armazenadas e desdobradas em madeira serrada, sendo posteriormente estocadas por um determinado período para secagem (ROCHA, 1999). O desdobro é o processamento das toras na serraria para conversão em madeira serrada e é dividido em duas partes: desdobro primário e secundário. O desdobro primário ocorre quando a tora passa pela serra de fita vertical e é transformada em pranchões, blocos e semi-blocos, e o processamento destes em serras circulares, pelas refiladeiras (canteadeiras) e destopadeiras, consiste no desdobro secundário, gerando como resíduo o pó-de-serragem, costaneiras e aparas.

Na Amazônia, as serrarias utilizam o desdobro convencional das toras, que consiste, na maioria das vezes, em um sistema de corte tangencial em sanduíche, no qual a tora é fatiada, tentando obter o maior número de peças (MURARA JUNIOR et al., 2005). O operador é quem visualiza todas as alternativas para tomada de decisão

de como serão feitos os cortes durante o desdobro da tora, tentando obter um nível ótimo de aproveitamento das toras (LEITE, 1994).

A indústria madeireira dos estados da Amazônia legal consumiu em 2009, 14,2 milhões de metros cúbicos em toras, que resultaram em 5,8 milhões de metros cúbicos de madeira serrada, o que representou um rendimento médio de 41%. Dos estados, o Acre foi o que mais se destacou apresentando o melhor aproveitamento da matéria-prima comparado aos demais (Tabela 1), com rendimento de 45,7%, seguido do Mato Grosso com 44,8%, Amapá com 43,6%, Roraima com 37,2% e Maranhão com 35,4%, apresentando o pior desempenho na atividade (PEREIRA et al., 2010; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014).

Tabela 1. Produção de madeira processada da Amazônia Legal em 2009 (Adaptado de PEREIRA et al., 2010).

Estado	Produção processada (mil m ³)	Madeira serrada	Produtos beneficiados	Laminados e compensados	Rendimento do processamento (%)
Acre	193	23	22	55	45,7
Amapá	41	88	12	-	43,6
Amazonas	144	86	14	-	39,2
Maranhão	90	85	-	15	35,4
Mato Grosso	1795	67	21	12	44,8
Pará	2550	80	8	12	38,6
Rondônia	925	64	23	13	41,7
Roraima	70	68	20	12	37,2
Amazônia Legal	5808	72	15	13	41,1

A determinação do rendimento no desdobro de toras é feito por meio da razão entre o volume de madeira serrada (m³) e o volume da tora (m³), em porcentagem (GOMIDE, 1974; TUSET; DURAN, 1979; ROCHA, 1999; BRAND et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2003; LATORRACA, 2004; BATISTA; CARVALHO, 2007), sendo influenciado principalmente pelo diâmetro, volume da tora, conicidade, qualidade da tora (presença de rachaduras, podridão e oco), tomada de decisões pelo operador durante o desdobro (STEELE, 1984; BIASI; ROCHA, 2006) e pelos produtos gerados (SOUZA et al., 2007). As toras com maiores diâmetros tendem a proporcionar maiores rendimentos, uma vez que o volume de madeira perdido com costaneiras e aparas é menor em porcentagem em relação ao volume das toras (WADE et al., 1992).

Gerwing et al. (2001) acreditam que esse volume perdido pode ser diminuído por meio da adoção de técnicas e procedimentos simples como o armazenamento das toras, o uso de equipamentos com melhor manutenção, treinamento de mão-de-obra e o desenvolvimento de novos produtos, o que pode aumentar o rendimento da matériaprima em até 12%. Já Batista e Carvalho (2007) avaliaram o rendimento de espécies em uma serraria de pequeno porte em Santanésia-RJ, que apresentou um bom desempenho (Tabela 2), sendo o rendimento médio em madeira serrada similar às demais serrarias nacionais.

Tabela 2. Rendimento médio em madeira serrada (modificado de Batista e Carvalho, 2007).

Variáveis	Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação (%)
Volume serrado por tora (m ³)	0,035	0,014	39,84
Volume por tora (m ³)	0,078	0,028	35,83
Rendimento (%)	44,86	5,36	12,11

Brand et al. (2002), trabalhando com dados da empresa Battistella em Santa Catarina, observaram diversas etapas do processo produtivo, e encontraram os menores valores para o rendimento das atividades de desdobro 34,87%, abaixo de valores encontrados na literatura para a mesma atividade com coníferas. Segundo Gomide (1974), um rendimento de 55 a 65% em coníferas é considerado normal, mas em folhosas o rendimento varia entre 45 e 55%, isto pelo fato das coníferas apresentarem tronco menos tortuoso, com menos defeitos e o alburno é sempre utilizável. No entanto, em um estudo realizado por Iwakiri (1990), o rendimento médio do desdobro das toras obtido foi de 41,9 a 61,8% para 20 espécies de madeira tropical.

Em 2004, mais de 80% da produção madeireira da Amazônia era constituída por madeira serrada e, em menor proporção, por produtos acabados de madeira (LENTINI et al., 2005). As empresas envolvidas nesta produção incluíam serrarias pequenas e rudimentares, serrarias comuns, equipadas com serras-de-fita e outras que também produziam produtos acabados.

As empresas predominantes em florestas de terra firme são serrarias convencionais equipadas com serras-de-fita, empregando de 30 a 40 pessoas. Em 2004, as serrarias comuns que beneficiavam madeira de florestas de terra firme representavam 60% das empresas madeireiras na Amazônia. Geralmente, a produção destas empresas é formada por cerca de 90% de madeira serrada, na forma

de peças para a construção civil, e 10% em produtos acabados, o que inclui peças para móveis, decking pisos (VERÍSSIMO et al., 2002). Os equipamentos utilizados são geralmente uma serra-de-fita industrial e serras auxiliares, pelo menos uma plaina, além de caminhões e empilhadeiras de madeira (LENTINI et al., 2005).

Para o desdobro de toras na forma de madeira serrada, são utilizadas determinadas técnicas que estão relacionadas ao maquinário utilizado, às formas de desdobro e principalmente à matéria prima. (OJO; OBALOKUN, 2005). As toras ou toretes são transformadas em produtos úteis de madeira, mediante aplicação de um ou mais processos mecânicos que as transformam em peças menores, conferindo-lhes forma, tamanho e superfície exigida para seus usos (VITAL, 2008). Esses processos devem converter a tora em produtos que satisfaçam especificações de qualidade, dimensões e acabamento. Por fim, os procedimentos de industrialização da madeira devem ser conduzidos de tal forma que a máquina não seja submetida a excessivo desgaste, dano ou destruição, reduzindo os custos de manutenção ou substituições (CARTER; SIRY, 2003).

As serras principais realizam as operações de desdobro principal e possuem funções como redução das dimensões das toras, diminuição da altura de corte e a facilitação de equipamentos menores em operações secundárias. Tais serras consistem em equipamentos de grandes dimensões, que demandam um maior consumo de energia para seu funcionamento. Nestas serras as toras são desdobradas longitudinalmente e transversalmente (ROCHA, 2007).

As máquinas e equipamentos utilizados no desdobro principal são serras de quadro ou alternativas; serras circulares; serras de fita e carro porta toras. A utilização desses equipamentos é capaz de gerar produtos e subprodutos, tais como: semiblocos, blocos, pranchões, tábuas, costaneiras, serragem e cavacos (ROCHA, 2002). A máquina mais versátil e mais empregada para o desdobro de toras é a serra de fita (VITAL, 2008), pois desdobra toras de diâmetros e densidades diferentes, com espessura de corte reduzida. Essa máquina exerce função imprescindível na serraria, pois é a primeira do fluxo produtivo (BIASI, 2005).

Segundo Rocha (2002, 2007), dentre os diferentes modelos de serra de fita, as mais utilizadas são a vertical simples, a dupla ou geminada e serra de fita horizontal. O carro porta toras é indispensável na operação de uma serraria. Tal equipamento possui a função de conduzir as toras até a máquina de desdobro (SILVA, 2010). Em todas as serrarias, estão presentes as serras circulares. O uso destas máquinas no

desdobro principal é pertinente em toras de pequenos diâmetros e matéria prima de baixo custo, devido à grande perda por serragem e por sua baixa versatilidade (MERRY et al., 2006). As serras circulares permitem a utilização de dois eixos, permitindo a redução das dimensões (diâmetro e espessura) dos discos, aumento da altura de corte e maior qualidade da madeira serrada (ROCHA, 2002). Objetivando-se um maior rendimento nas operações de desdobro, muitas técnicas estão em desenvolvimento e posteriormente sendo aplicadas às indústrias madeireiras, mas ainda assim o rendimento da madeira serrada ainda fica em torno de 50% (NYRUD; BAARDSEN, 2003).

Para uma serraria apresentar rendimentos satisfatórios se deve analisar vários fatores em conjunto, e um destes fatores são os sistemas de desdobro. Entre os métodos de desdobro mais comuns existem o tangencial, o radial (ABREU et al., 2005). O desdobro tangencial consiste na obtenção de peças tangenciais às camadas de crescimento. Entretanto, quando o corte passa pela proximidade da medula, ou tem orientação diametral, também são obtidas peças com face radial.

O desdobro tangencial, por exemplo, é preferido na Austrália por apresentar melhor desenho, maior rendimento em madeira serrada, menor limitação de largura das peças e maior rapidez de secagem (VITAL, 2008). Este método apresenta também a vantagem de permitir que o empenamento apresentado pelas peças seja mais facilmente corrigido do que o apresentado pelas peças radiais. O desdobro radial consiste em uma sequência de cortes aproximadamente radiais ao centro da tora. Esse tipo de corte forma peças com desenhos mais retos e é comumente adotado para reduzir os efeitos das tensões de crescimento.

Tecnicamente o desdobro tangencial é utilizado principalmente em toras de grandes diâmetros, uma vez que em pequenos diâmetros resulta em grande quantidade de peças de pequena largura (ROCHA, 2007). Uma comparação entre os métodos de desdobro radial e tangencial em toras de *Eucalyptus grandis* (12 anos de idade) e *Eucalyptus dunnii* (16,5 anos de idade) foi tema de pesquisa de Rocha e Tomaselli (2001), que afirmam que os defeitos como arqueamento e encurvamento provocados pelas tensões de crescimento foram de menor intensidade e maiores para as rachaduras em tábuas provenientes do desdobro tangencial.

Os produtos de madeira incluem grande variedade de itens, destacando-se compensado, madeira serrada, molduras, esquadrias, pisos e painéis. O maior dinamismo tem vindo de pisos de folhosas (maciços e engenheirados) e seus

complementos (molduras, rodapés, entre outros), com crescimento na receita de exportações de 60% de 2005 para 2007 (ALMEIDA et al., 2010b; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014). E continuando nesse ritmo, o Brasil poderá alcançar participação relevante no mercado internacional de pisos de madeira nos próximos anos. A extração e o processamento primário de madeira nativa estão concentrados quase que totalmente na Amazônia, sobretudo nos estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia. No entanto, a ocupação da Amazônia vem se dando de forma caótica, com elevados índices de desmatamento (VERÍSSIMO et al., 1998; ROMA; ANDRADE, 2013).

2.3 A importância de equações de volume na produção de madeira

Em algumas áreas de florestas nativas da Amazônia Brasileira, ainda é comum estimar o volume comercial com casca utilizando um fator de forma ou fator de expansão fixo. Nesse sentido, Heinsdijk e Bastos (1963) propuseram um valor de 0,7 na estimação do volume sendo multiplicado pela área da base e altura comercial ou total da árvore. No entanto, essa aplicação de forma generalizada, para diferentes espécies, sítios, formações e tipologias florestais, ainda ocasiona sérios erros nas estimativas volumétricas (ROLIM et al., 2006; CYSNEIROS et al., 2017), sendo recomendado o uso de equações específicas em nível de sítio e/ou espécie (LIMA et al., 2014).

Com o intuito de preencher esta lacuna técnica e minimizar o viés da estimativa volumétrica para florestas nativas, com ou sem plano de manejo, vários trabalhos objetivando equações de volume foram desenvolvidas em diferentes regiões da Amazônia, tais como: Fernandes et al. (1983); Figueiredo Filho (1983); Silva e Araújo (1984); Silva e Carvalho (1984); Silva et al. (1984); Higuchi e Ramm (1985); Baima et al. (2001); Rolim et al. (2006); Hiramatsu, (2008); Barros e Silva Júnior (2009); Colpini et al. (2009); Leite e Resende (2010); Lima (2010); Thaines et al. (2010); Barreto et al. (2014); Lima et al. (2014); Gimenez et al. (2015); Tonini e Borges (2015).

No entanto, informações técnicas sobre a predição volumétrica comercial das florestas nativas no Amapá ainda são escassas, logo, é importante desenvolver trabalhos com equações de volume ou ajuste e seleção de modelos estatísticos, em nível de área manejada e de espécies (LIMA et al., 2014) e de volume de madeira serrado, objetivando obter estimativas mais fidedignas da produção florestal.

A modelagem estatística para predição de variáveis de difícil mensuração, não é uma tarefa trivial, principalmente porque para o desenvolvimento de uma equação volumétrica se necessita de árvores caídas e, ou abatidas, o que não é um trabalho fácil em florestas nativas. Segundo Thaines et al. (2010), a necessidade de quantificação de estoque de matéria-prima florestal, em floresta nativa, nos leva a buscar métodos eficientes de estimativa do volume comercial de madeira das árvores, que possibilite quantificar o estoque presente e futuro de maneira eficiente, norteador decisões silviculturais que culminem na máxima produção e rentabilidade da floresta.

A necessidade de dispor de uma ferramenta simplificada que permita a obtenção de valores precisos do volume de madeira comercial de uma espécie é vital para a planificação da gestão das massas florestais e para sua ordenação sustentável (SANTOS, 2010). Isto porque árvores de igual diâmetro e altura podem apresentar volumes diferentes, se as formas dos troncos não forem iguais. É comum, então, fazer referência a algumas formas geométricas de fórmulas conhecidas, como parabolóide, cônica, cilíndrica ou neilóide, a fim de facilitar a compreensão do cálculo do volume (CAMPOS; LEITE, 2009).

Neste sentido, existem muitos problemas florestais que são solucionados com o objetivo de reduzir tempo de custo na coleta de dados por meio de análise de regressão, a qual é capaz de permitir a escolhas de equações que fornecem estimativas com boa precisão e eficiência (SCHNEIDER et al., 2009).

A vantagem das equações de volume é o cálculo de volume sólido, árvore a árvore, por meio de modelos estatísticos, especialmente testados para apresentar os menores erros possíveis. As equações de volume, cujos modelos incluem como variável independente, a altura e o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) da árvore, são mais gerais podendo abranger sítios diferentes. Já, o uso de fatores de forma médio deve ser restrito às condições de sítio. Logo, qualquer extrapolação além desses limites pode ser perigosa sob o ponto de vista de previsão dos resultados (COUTO; BASTOS, 1987).

Diferentes condições de clima e solo influenciam o crescimento e relação entre as variáveis da árvore. Dessa forma, o ajuste e seleção de modelos baseados em dados de um povoamento ou de uma região sujeita às condições uniformes de clima e de solo permite o fornecimento aos produtores florestais de ferramentas que possibilitam a estimação mais precisas das variáveis, como o volume, nesse povoamento ou região (VALENTE et al., 2011). Assim, equações desenvolvidas

especificamente para áreas sob planos de manejo florestal, constitui o procedimento mais eficiente, econômico e com precisão aceitável para a quantificação da produção em volume da floresta ou de uma empresa (BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009).

A abordagem de seleção de modelos via análise de regressão possui algumas vantagens sobre as técnicas empíricas na predição do volume comercial em florestas naturais (SCHNEIDER et al., 2009; LIMA, 2013). Em primeiro lugar, faz-se comparações simultâneas com dois ou mais modelos. Apesar de mais de um modelo poder ser selecionado, essa abordagem geralmente ajuda a eliminar modelos que definitivamente não geram boas descrições, um processo fundamental para o avanço científico em qualquer disciplina (PLATT, 1964; LIMA, 2013). Em segundo lugar, ela requer um exercício teórico e criativo prévio para buscar modelos que representem explicações real dos dados. E em terceiro lugar, a comparação entre modelos concorrentes é baseada em critério baseados no suporte que os dados observados oferecem, sendo baseado em critérios de inferência preditiva clássica ou bayesiana.

De acordo com Ely (2016), em uma abordagem sobre viés e variância de modelos estatísticos, ao fazer previsões e inferências deve-se separar a amostra em uma parte em que se estimará o modelo (dados de treinamento) e outra parte em que se avaliará a qualidade da previsão (dados de teste ou validação). Quando se trata de escolher o modelo, parâmetros e variáveis a serem utilizadas, têm-se as seguintes opções: (i) utilizar um modelo complexo que é capaz de reduzir consideravelmente o erro de previsão nos dados de treinamento, mas ao mesmo tempo não é tão generalizável a ponto de apresentar um bom resultado nos dados de validação. Nesse caso, teoricamente opta-se por estimar um modelo com viés baixo e variância alta. Ou seja, com os dados de ajuste, o modelo irá ter um erro de previsão baixo, mas quando se avalia o modelo em um novo conjunto de dados (validação), o erro sobe consideravelmente, e por isso diz-se que sua variância é alta. Este é o típico caso de superestimação ou overfitting; (ii) utilizar um modelo simples e generalizável, mas não reduz consideravelmente o erro de previsão nos dados de validação. Nesse caso tem-se um modelo com viés mais alto, mas variância baixa. Assim, pode-se permitir um erro de previsão maior no ajuste de modo a obter um erro de previsão semelhante (com pouca variância) na validação. Esse é o típico caso de subestimação ou underfitting.

Em geral, para as florestas nativas da região Amazônica as equações de volume publicadas se restringem a uma determinada área ou espécie e ainda são

insipientes os casos de ajuste e seleção de modelos por meio de aplicação de técnicas de validação e seleção de base de dados para estudo de viés e erros de estimativa. Assim, o desenvolvimento de equações de volume para as floresta e espécies comerciais do Amapá, por meio do ajuste e seleção de modelos se tornam uma importante ferramenta para predições do estoque volumétrico tanto na produção de madeira bruta em tora quanto na produção de madeira serrada.

REFERÊNCIAS

Ab' SABER, A. N. Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira. *Estudos Avançados*, São Paulo, SP, v. 16, n. 45, p. 7-30, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142002000200002>.

Ab' SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. 3. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

Ab' SABER, A. N. Megageomorfologia do território brasileiro. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Geomorfologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

Ab' SABER, A. N. Participação das depressões periféricas e superfícies aplainadas na compartimentação do planalto brasileiro – considerações finais e conclusões. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, SP, v. 19, n. 2, p. 51-69, 1998. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.19980006>.

ABREU, F. A.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M. Eficiência operacional de serra fita: estudo de caso em duas serrarias no município de Paragominas, PA. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 12, n. 1, p. 44-49, 2005. Disponível em: <http://www.floram.org/articles/view/id/4fede5e31ef1fa8b5b000002>. Acesso em: 5 out. 2017.

AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rainforest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, n. 1-3, p. 41-48, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.022>.

ALMEIDA, A. N. et al. Análise dos fatores que influenciam o preço da madeira em tora para o processamento mecânico no Paraná. **Cerne**, Lavras, MG, v. 16, n. 2, p. 243-50, 2010b. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000200017>.

ALMEIDA, A. N. et al. Mercado de madeiras tropicais: substituição na demanda de exportação. **Acta Amazônica**, Manaus, AM, v. 40, n. 1, p. 119-126, 2010a. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000100015>.

AMARAL, P. et al. **Floresta para sempre**: um manual para a produção de madeira na Amazônia. Belém: Imazon, 1998. Disponível em: <https://www.ufrb.edu.br/biblioteca/documentos/category/9-floresta-para-sempre-um-manual-para-a-producao-de-madeira-na-amazonia?download=209:floresta-para->

sempre-um-manual-para-a-producao-de-madeira-na-amazonia. Acesso em: 25 fev. 2017.

ÂNGELO, H. **As exportações brasileiras de madeiras tropicais**. 1998. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/25304/T%20-%20ANGELO%2C%20HUMBERTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 2 fev. 2017.

ÂNGELO, H.; SILVA, D. A. As exportações brasileiras de mogno (*Swieteniamacrophilla*, King). **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 113-121, 1998.

ARIMA, E. et al. **As florestas nacionais na Amazônia**: uma consulta a empresários madeireiros e a atores afins à política florestal. Brasília, DF: MMA, 2002. (Relatório Técnico). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276127395>. Acesso em: 12 set. 2017.

ARIMA, E.; VERÍSSIMO, A. **Preços de madeira em pólos madeireiros próximos de cinco florestas nacionais na Amazônia**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2002.

AZEVEDO, C. P. **Dinâmica de florestas submetidas a manejo na Amazônia Oriental**: experimentação e simulação. 2006. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_dr/2006/t193_0247-D.pdf. Acesso em: 8 fev. 2017.

BAIMA, A. V.; SILVA, S. M. S.; SILVA, J. N. M. Equações de volume para floresta tropical de terra firme em Moju, PA. In: SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; YARED, J. A. G. (Eds.). **A Silvicultura na Amazônia Oriental**: contribuições do projeto silvicultura tropical. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001, p. 367-392.

BARRETO, P. et al. **Custos e benefícios do manejo florestal para produção de madeira na Amazônia Oriental**. Belém, PA: IMAZON, 1998. (Série Amazônia, 10). Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/11971>. Acesso em: 12 mar. 2017.

BARRETO, W. F. et al. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 34, n. 80, p. 321-329, 2014. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.721>.

BARROS, P. L. C.; SILVA JÚNIOR, 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**, Belém, PA, n. 51, p. 115-126, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/146>. Acesso em: 22 fev. 2017.

BARROS, A. C.; UHL, C. Logging along the Amazon River and estuary: patterns, problems, and potential. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 77, n. 1-3, p. 87-105, 1995. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03574-T](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03574-T).

BARROS, A. C.; UHL, C. **Padrões, problemas e potencial da extração madeireira ao longo do rio Amazonas e do seu estuário**. Belém, PA: IMAZON, 1997. (Série Amazônia, 4). Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_padroes,_19498.pdf. Acesso em: 10 fev. 2017.

BATISTA, A. P. B. et al. Caracterização estrutural em uma floresta de terra firme no estado do Amapá, Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 81, p. 21-33, 2015. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.81.689>.

BATISTA, D. C.; CARVALHO, A. M. Avaliação do desempenho operacional de uma serraria através de estudo do tempo, rendimento e eficiência. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 75, p. 31-38, 2007. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr75/cap03.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2017.

BERGER, R. et al. Análise econômica da industrialização primária da madeira na região amazônica. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 9, n. 1, p. 9-17, 2002. Disponível em: <http://www.floram.org/articles/view/id/4fed91491ef1fa0b3c000008>. Acesso em: 8 fev. 2017.

BETTINGER, P. et al. **Forest management and planning**. Burlington: Academic Press, 2009.

BIASI, C. P. **Rendimento e eficiência no desdobro de três espécies tropicais**. 2005. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/3180/BIASI%202005.pdf?sequence=1>. Acesso em: 4 jul. 2017.

BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 37, n. 1, p. 95-108,

2002. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/7845/5537>. Acesso em: 4 jun. 2017.

BRAND, M. A. et al. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 32, n. 2, p. 247-259, 2002. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2288/1911>. Acesso em: 4 jul. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa, nº 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**, Brasília, DF, v.143, n.238, seção 1, p.155-159, 2006.

BUONGIORNO, J.; GILLES, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego: Academic, 2003.

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

CARTER, D. R.; SIRY, J. P. Timber production efficiency analysis: theoretical foundations and empirical applications. In: SILLS, E.; ABT, K. (Eds.) **Forests in a market economy**. Boston: Kluwer Academic, 2003. p. 97-115.

CLEMENT, C. R.; HIGUCHI, N. A floresta Amazônica e o futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**, São Paulo, SP, v. 58, n. 3, p. 44-49, 2006. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252006000300018. Acesso em: 4 jul. 2016.

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

COLPINI, C. et al. 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**, Manaus, AM, v. 39, n. 1, p. 97-104, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100010>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Cadeia produtiva de florestas nativas: encontro da indústria para a sustentabilidade**. Brasília, DF: CNI; Fórum Florestal, 2012.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de eucalyptus no estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, SP, n. 37, p. 33-44, 1987. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr37/cap04.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2017.

CYSNEIROS, V. C. et al. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 45, n. 114, p. 295-304, 2017. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06>.

DAVIS, L. S. et al. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values**. Columbus: McGraw-Hill, 2005.

DYKSTRA, D. P. **Mathematical programming for natural resource management**. New York: McGraw-Hill, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA; SPI, 2006. 306 p.

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**, Manaus, AM, v. 13, n. 3/4, p. 537-545, 1983. <https://doi.org/10.1590/1809-439219831334537>.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira**. 1983. 176 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26612/D%20-%20FIGUEIREDO%20FILHO%2C%20AFONSO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 jul. 2017.

GERWING, J. et al. **Rendimento no processamento de madeira no estado do Pará**. Belém, PA: Imazon, 2001. (Série Amazônia, 18). Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_o_para_10550.pdf. 10 mai. 2017.

GIMENEZ, B. O. et al. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 43, n. 106, p. 291-301, 2015. Disponível em:

<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=05&Number=106&p=s>. Acesso em: 4 jul. 2017.

GOMIDE, J. L. **Serraria**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1974.

HIGUCHI, N. et al. **Noções básicas de manejo florestal**. Manaus: INPA, 2008.

HIGUCHI, N. et al. Perspectivas do manejo florestal sustentável para à Amazônia Brasileira. **Hiléia**, Manaus, AM, v. 8, p. 78-93, 2010.

HIGUCHI, N. Exploração seletiva de madeira na Amazônia brasileira: sua relação com o desmatamento e o mercado internacional de madeira dura tropical. In: HIGUCHI, N. et al. (Eds.). **Bionte: biomassa e nutrientes florestais**. Manaus, AM: INPA, 1997. p. 111-126.

HIGUCHI, N.; RAMM, W. Developing bole wood volume equations for a group of tree species of central amazon (Brazil). **Commonwealth Forestry Review**, London, v. 64, n. 1, p. 33-41. 1985. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/42608005>. Acesso em: 4 jul. 2017.

HIRAMATSU, N. A. **Equações de volume comercial para espécies nativas na região do Vale do Jari, Amazônia Oriental**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/30064/R%20-%20D%20-%20NELSON%20AKIRA%20HIRAMATSU.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 jul. 2017.

HOLMES, T. et al. **Custos e benefícios financeiros da exploração florestal de impacto reduzido em operação à exploração florestal convencional da Amazônia Oriental**. Belém, PA: Imazon, 2002. Disponível em: http://ift.org.br/wp-content/uploads/2015/05/Holmes_Custos_Beneficios_2002.pdf. Acesso em: 22 jun. 2017.

IIDA, Y. et al. Tree architecture and life-history strategies across 200 co-occurring tropical tree species. **Functional Ecology**, London, v. 25, n. 6, p.1260-1268, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01884.x>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2012. (IBGE. Manuais Técnicos em Geociências, 1). Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2017.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION - ITTO. **Sustaining tropical forests**. Annual Report. 2017. Disponível em: <http://www.itto.int>. Acesso em: 4 jul. 2017.

IWAKIRI, S. Rendimento e condições de desdobro de 20 espécies de madeiras da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 20, p. 271-281, 1990. <https://doi.org/10.1590/1809-43921990201281>.

JOHNS, A. G. **Timber Production and Biodiversity Conservation in Tropical Rain Forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage in planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 89, n. 1-3, p. 59-77, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03869-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03869-8).

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas: possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn: GTZGmbH, 1990. 343 p.

LATORRACA, J. V. F. **Processamento mecânico da madeira**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2004.

LEITE, H. G. **Conversão de troncos em multiprodutos da madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://www.scienceopen.com/document?vid=6463e0f1-0650-4ef6-8c11-d51179879c59>. Acesso em: 4 jul. 2017.

LEITE, F. S.; RESENDE, A. V. Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 20, n. 1, p. 69-79, 2010. <https://doi.org/10.5902/198050981762>.

LENTINI, M. et al. **Fatos florestais da Amazônia 2005**. Belém, PA: Imazon, 2005a.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. **A expansão madeireira na Amazônia**. Belém, PA: Imazon, 2005b. Disponível em:

<http://www.portalces.org/sites/default/files/a-expansao-madeireira-na-amazonia.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2017.

LEUSCHNER, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling, and planning techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

LIMA, A. J. N. **Avaliação de um sistema de inventário florestal contínuo em áreas manejadas e não manejadas do estado do Amazonas (AM)**. 2010, 183 f. Tese (Doutorado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) - Universidade Federal do Amazonas. Disponível em: <http://bdt.d.inpa.gov.br/handle/tede/1196>. Acesso em: 20 jul. 2017.

LIMA, R. A. F. **Ajuste e seleção de modelos na descrição de comunidades arbóreas: estrutura, diversidade e padrões espaciais**. 2013. 196 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-22102013-150112/en.php>. Acesso em: 20 jul. 2017.

LIMA, R. B. et al. Volumetria e classificação da capacidade produtiva para *Mora paraensis* (Ducke) no estuário amapaense. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 42, n. 101, p. 141-154, 2014. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=13&Number=101>. Acesso em: 20 jul. 2017.

MATSUNAGA, A. T. **Análise econômica da cadeia produtiva da madeira oriunda de plano de manejo florestal estudo de caso**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/15012>. Acesso em: 20 jul. 2017.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT. **Comunicação nacional inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF: MCT, 2004. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 11 Ago. 2017.

MEDEIROS, R. M. **Estratificação volumétrica e crescimento em uma floresta ombrófila densa, município de Almerim, Estado do Pará**. 2008, 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/ciencia%20florestal/2008/214961f.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2017.

MERRY, F. et al. Industrial development on logging frontiers in the Brazilian Amazon. **International Journal of Sustainable Development**, London, v. 9, p. 277-296, 2006. <https://doi.org/10.1504/IJSD.2006.012849>.

MURARA JUNIOR, M. I.; ROCHA, M. P.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Rendimento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 3, p. 473-483, 2005. <https://doi.org/10.5380/ufpr.v35i3.5186>.

NASCIMENTO, R. G. M. **Modelagem e prognose da produção em uma floresta tropical úmida densa de terra-firme na Amazônia Central**. 2012. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/28372/R%20-%20D%20-%20RODRIGO%20GERONI%20MENDES%20NASCIMENTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 ago. 2017.

NYRUD, A. Q.; BAARDSEN, S. Production efficiency and productivity growth in Norwegian sawmilling. **Forest Science**, New York, v. 49, n. 1, p. 89-97, 2003. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/saf/fs/2003/00000049/00000001/art00007>. Acesso em: 11 ago. 2016.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LAS MADERAS TROPICALES - OIMT. **Reseña anual y evaluación de la situación mundial de las maderas**. Yokohama: OIMT, 2012.

OJO, S. O.; OBALOKUN, B. M. Analyses of productivity and technical efficiency of sawmill industries in Nigeria. **Journal of Tropical Forest Science**, Rabu, v. 17, n. 3, p. 428-437, 2005. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/23616676?seq=1#page_scan_tab_contents. Acesso em: 11 ago. 2016.

OLIVEIRA, A. D. de et al. Viabilidade econômica de serrarias que processam madeira de florestas nativas: o caso do município de Jarú, estado de Rondônia. **Cerne**, Lavras, MG, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2003. Disponível em: <http://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/download/596/508>. Acesso em: 10 nov. 2016.

OLIVEIRA, A. N.; AMARAL, I. L. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 34, n. 1, p. 21-34, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000100004>.

PEREIRA, D. et al. **Fatos florestais da Amazônia 2010**. Belém, PA: Imazon, 2010. Disponível em: http://ift.org.br/wp-content/uploads/2014/11/FatosFlorestais_2010.pdf, Acesso em: 12 mar. 2017.

PEREIRA, D.; VERÍSSIMO, A. **Relatório analítico de oferta e demanda de madeira para a produção moveleira na Região Norte (Amapá, Pará, Rondônia e Tocantins)**. Belém, PA: Imazon, 2010. (Relatório Técnico).

PIRES, J. M.; PRANCE, G. T. The vegetation types of the Brazilian Amazon. In: PRANCE, G. T.; LOVEJOY, T. E. (Eds.). **Key environments: Amazonia**. Oxford, UK: Pergamon, 1985. p. 109-145.

PLATT, J. R. Strong inference. **Science**, New York, v. 146, n. 3642, p. 347-353, 1964. <https://doi.org/10.1126/science.146.3642.347>.

RABELO, B. V. et al. **Macrodiagnóstico do Estado do Amapá: primeira aproximação do ZEE**. 3. ed. Macapá, AP: IEPA, 2008. Disponível em: <http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2017.

RAMOS, M. G. O.; AZEVEDO, M. R. Q. **Ecosistemas da Amazônia**. Natal, RN: UFRN, 2009.

ROCHA, M. P.; TOMASELLI, I. Efeito de modelo de corte nas dimensões de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 8, n.1, p. 94-103, 2001. Disponível em: <http://www.floram.org/files/v8núnico/v8nunicoa12.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2016.

ROCHA, M. P. **Desdobro primário da madeira**. Curitiba, PR: FUPEF, 1999. (Série Didática, n. 2).

ROCHA, M. P. **Técnicas de planejamento em serrarias**. Curitiba, PR: FUPEF, 2002. (Série Didática, n. 1/2).

ROCHA, M. P. Técnicas de serrarias. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Gerônimo Monteiro: UFES, 2007. p. 209-270.

ROLIM, S. G. et al. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000100013>.

ROMA, J. C.; ANDRADE, A. L. C. Economia, concessões florestais e a exploração sustentável de madeira. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, Brasília-DF, v. 8, p. 91-96, 2013. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5614/1/BRU_n08_economia.pdf. Acesso em: 10 jun. 2017.

SABOGAL, C. et al. **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira**. Belém, PA: CIFOR, 2006. Disponível em: <http://imazon.org.br/pdf/portugues/livretos/manejo-florestal-empresarial-na-amazonia.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2017.

SANTANA, A. C. et al. O valor econômico da extração manejada de madeira no baixo amazonas, estado do Pará. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 527-536, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300015>.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal**. Lavras: Editora UFLA/FAEPE, 1998.

SERAFIM, A. B. A sustentabilidade na visão de acadêmicos de IES de Curitiba e região metropolitana. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL DE GESTIÓN UNIVERSITARIA, 16., 2016, Arequipa. **Anais...** Florianópolis, SC: UFSC, 2016. p. 1-12. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/171016>. Acesso em: 28 jul. 2017.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Florestas do Brasil em resumo: dados de 2005-2010**. Brasília, DF: SFB, 2010.

SILVA, J. C.; ALMEIDA, A. N.; POMPERMAYE, R. S. Análise estratégica do manejo florestal na Amazônia brasileira. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 44, n. 3, p. 341-348, 2014. <https://doi.org/10.5380/ufpr.v44i3.33979>.

SILVA, J. N. M.; ARAÚJO, S. M. A. Equação de volume para árvores de pequeno diâmetro na Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, PR, n. 8/9, p. 16-25, 1984. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/5022/1/jnsilva2.pdf>. Acesso: 5 set. 2017.

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, M. S. P. Equações de volume para uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, PR, n. 8/9, p. 26-34, 1984. Disponível em:

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/5021/1/jnsilva.pdf>. Acesso: 3 set. 2017.

SILVA, J. N. M. Equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, PR, n. 8/9, p. 50-63, 1984. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/5024/1/jnsilva3.pdf>. Acesso: 3 set. 2017.

SMERALDI, R.; VERÍSSIMO, A. **Acertando o alvo**: consumo de madeira no mercado interno brasileiro e promoção da certificação florestal. São Paulo, SP: Amigos da Terra - Programa Amazônia; Piracicaba, SP: IMAFLORA; Belém, PA: Imazon, 1999. Disponível em: <http://www.terrabrazilis.org.br/ecotecadigital/pdf/acertando-o-alvo-consumo-de-madeira-no-mercado-interno-brasileiro-e-promocao-da-certificacao-florestal.pdf>. Acesso em: 10 Mai. 2017.

SOBRAL, L. et al. **Acertando o alvo 2**: consumo de madeira amazônica e certificação florestal no estado de São Paulo. Belém, PA: Imazon, 2002. Disponível em: <http://www.terrabrazilis.org.br/ecotecadigital/images/25abr%20acertando.pdf>. Acesso em: 10 Mai. 2017.

SOUZA, A. L. et al. Estratificação volumétrica por classes de estoque em uma floresta ombrófila densa, no município de Almeirim, estado do Pará, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 3, p. 533-541, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300016>.

SOUZA, A. N. et al. Modelagem do rendimento no desdobro de toras de eucalipto cultivado em sistema agroflorestal. **Cerne**, Lavras, MG, v. 13, n. 2, p. 222-238, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/871>. Acesso: 3 set. 2017.

STEELE, P. H. **Factors determinin glumberre covery in sawmilling**. Madison: U.S. Department of Agriculture; Forest Service; Forest Products Laboratory, 1984. Disponível em: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr39.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2017.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA - SUDAM. **Rendimento em serraria de trinta espécies de madeiras amazônicas**. Belém, PA: SUDAM, 1981.

THAINES, F. et al. Equações para a estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 30, n. 64, p. 283-289, 2010. <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.64.283>.

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no Sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 35, n. 82, p. 11-117. 2015. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.738>.

TUSET, A.; DURAN, F. **Manual de madeiras comerciais, equipos e processo de utilizacions**. Montevideo: Hemisfério Sul, 1979.

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation effects on fire susceptibility and the potential response of tree species of fire in the rainforest of the eastern Amazon. **Ecology**, Washington, v. 71, n. 2, p. 437-449, 1990. <https://doi.org/10.2307/1940299>.

VALENTE, M. D. R. Modelo de predição para o volume total de Quaruba (*Vochysia inundata* Ducke) via análise de fatores e regressão. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 307-317, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000200015>.

VALOIS, A. C. C. **A biodiversidade e os recursos genéticos**. Disponível em: <http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/livroorg/biodiversidade.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2017.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Wallingford: CAB International, 1994.

VELOSO, H. P. et al. **Vegetação: as regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos: estudo fitogeográfico**. Rio de Janeiro, RJ: Projeto Radambrasil, 1975.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 1991.

VERÍSSIMO, A. et al. Impactos da atividade madeireira e perspectivas para o manejo sustentável da floresta numa velha fronteira da Amazônia: o caso de Paragominas. In: ALMEIDA, O. (Ed.). **Evolução da fronteira amazônica: oportunidades para um desenvolvimento sustentável**. Belém, PA: Imazon, 1996. p. 7-35.

VERÍSSIMO, A. et al. Priority areas for establishing national forests in the Brazilian Amazon. **Conservation Ecology**, Amsterdam, v. 6, n. 1, p. 1-4, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.5751/ES-00377-060104>.

VERÍSSIMO, A. et al. Zoning of timber extraction in the Brazilian Amazon: a test case using Pará State. **Conservation Biology**, Amsterdam, v. 12 n. 1, p. 1-10, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1998.96234.x>.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E. **Caracterização dos pólos madeireiros da Amazônia legal**. Belém, PA: Imazon, 1999.

VERÍSSIMO, A.; SMERALDI, R. **Acertando o alvo**: consumo de madeira no mercado interno brasileiro e promoção da certificação florestal. São Paulo, SP: Imazon, 1999. Disponível em: <http://www.terrabrazilis.org.br/ecotecadigital/pdf/acertando-o-alvo-consumo-de-madeira-no-mercado-interno-brasileiro-e-promocao-da-certificacao-florestal.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2017.

VIDAL, E.; BARRETO, P. **Development of managed and unmanaged forests seven years after logging in the eastern Brazilian Amazon**. Belém, PA: Imazon, 2002.

VITAL, B. R. **Planejamento e operação de serrarias**. Viçosa, MG: UFV, 2008.

WADE, M. W. et al. Estimating hardwood sawmill conversion efficiency based on sawing machine and log characteristics. **Forest Products Journal**, Amsterdam, v. 42, n.12, p. 21-26, 1992. Disponível em: https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_wade004.pdf. Acesso em: 21 jun. 2017.

ZACHOW, R. **Metodologia de monitoramento em plano de manejo de floresta tropical**. Curitiba, PR: UFPR, 1998.

CAPÍTULO 1

PRECISÃO NAS ESTIMATIVAS DO VOLUME COMERCIAL EM FLORESTAS TROPICAIS: PREDIÇÕES POR EQUAÇÕES ESPECÍFICAS, GENÉRICAS E FATOR DE FORMA

1. INTRODUÇÃO

Nos trópicos, cerca de 40% do comércio de madeira serrada resulta anualmente de florestas naturais (PAYN et al., 2015). O Brasil é um dos maiores produtores de madeira serrada tropical, com 81 milhões de m³ (48% da produção total) de toras colhidas anualmente (2005-2008) em florestas naturais (BLASER et al., 2011). Em seus esforços para promover o manejo florestal sustentável, o governo do Brasil aplicou um conjunto de regulamentos, definindo, designadamente, uma colheita máxima permitida de 30 m³ por hectare quando mecanizada, e 10 m³ por hectare quando a operação não usa maquinaria pesada, em 35 e 10 anos de ciclo de corte, respectivamente (VERÍSSIMO, 2006; ROMA; ANDRADE, 2013), o que implica na necessidades de estimativas fidedignas da produção volumétrica comercial.

A precisão nas estimativas do volume comercial tanto em níveis de árvores, de espécies e de povoamento é, portanto, fundamental para a tomada de decisões no manejo sustentável dos recursos florestais (CLUTTER et al., 1983; BUONGIORNO; GILLES, 2003; BURKHART; TOMÉ, 2012). Em um contexto mais amplo, os estoques de madeira comercial (CTS) permitem que o valor monetário dos bens e serviços fornecidos pelas florestas seja estimado (ALTRIELL et al., 2009). Atualmente, o CTS permanece estimado com base em aproximações brutas em um fator de expansão fixo proposto por Heinsdijk e Bastos (1963) (ou seja, volume = $g \times H \times ff$). Contudo, o volume, a altura e a forma das árvores são conhecidos por variar grandemente em grandes gradientes ecológicos (NOGUEIRA et al., 2008; LINES et al., 2012) e em menor escala devido à competição por luz e nutrientes (IIDA et al., 2011; RUTISHAUSER et al., 2016). Para explicar esta variabilidade, várias equações de volume foram desenvolvidas para florestas nativas na Amazônia (SILVA et al., 1984; ROLIM et al., 2006; BARROS; SILVA JÚNIOR., 2009; THAINES et al., 2010; SILVA; SANTANA, 2014; HIGUCHI et al., 2015) e não menos importante, o desenvolvimento

de fatores de forma tornou-se uma ferramenta útil em casos específicos de local e/ou espécies (COLPINI et al., 2009).

O Estado da Amapá promoveu 2,3 milhões de hectares (16,5% de sua área) de florestas primárias, como Floresta Estadual - FLOTA/AP, para combater o desmatamento rápido e a degradação florestal além de promover uma colheita de madeira sustentável (IEF, 2017). Logo, estimativas precisas e confiáveis de CTS na Flota são necessárias para nortear o aproveitamento máximo e definir regulamentos eficientes que sustentam a produção de madeira bem como os rendimentos e o funcionamento da floresta a longo prazo. Porém, nenhuma equação volumétrica foi desenvolvida para esta região e a eficiência dos modelos em outras áreas em trabalhos publicados permanece desconhecida.

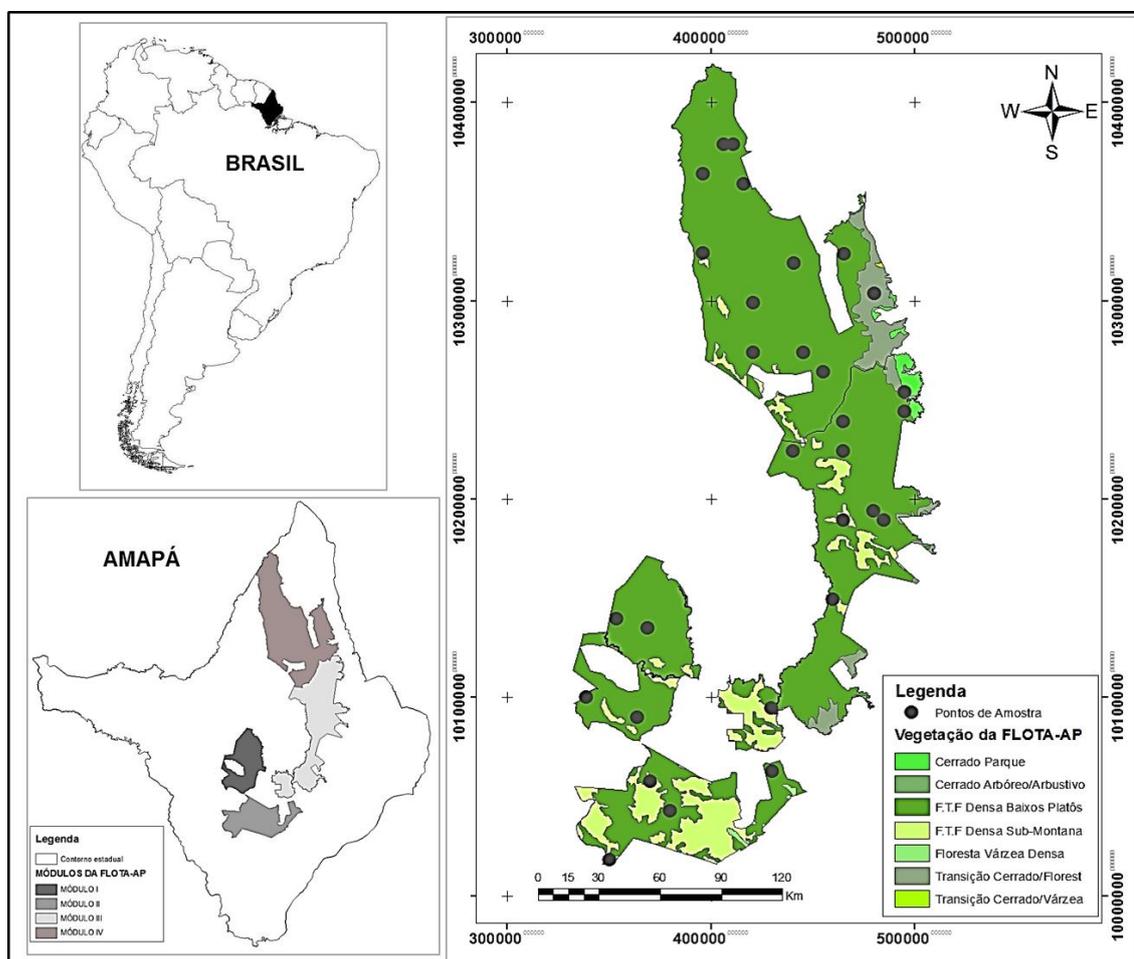
O presente estudo pretende preencher essa lacuna fornecendo alternativas confiáveis para obtenção do volume comercial com casca para diferentes áreas na Floresta Estadual do Amapá. Assim, este trabalho aborda sobre: (1) desenvolvimento de modelos volumétricos genéricos e específicos por tipologia florestal com base em um conjunto de dados originais de 1264 árvores comerciais; (2) propor algumas orientações sobre o tamanho mínimo da amostra ao desenvolver modelos volumétricos a escala regional; (3) testar a capacidade de um único fator de forma e modelos volumétricos genéricos para estimar o volume médio nas florestas nativas do Amapá.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Floresta Estadual do Amapá, localizada na região central do Amapá (Figura 1), Amazônia, Brasil (01°15'52,01"N; 51°24'05,18"O). Consiste em uma área descontínua de 2.369.400 hectares distribuídos em quatro módulos de produção sendo formada por três principais tipologias florestais: nas florestas de terra firme de baixo platô (54,86%), florestas de terra firme densas sub-montanas (16,88%), e transição cerrado-floresta (10,55%) (IEF, 2017).

Figura 1. Mapa de localização da Floresta Estadual do Amapá. As unidades de amostra (pontos) foram localizadas aleatoriamente nos diferentes tipos de floresta.



O clima da região é equatorial úmido com temperatura média de 25 °C e precipitação anual de 2800 mm. O período mais chuvoso ocorre de março a maio (acima de 1.000 mm).

Os tipos de floresta dominantes são descritos em termos de abundância das espécies arbóreas, altitude e geomorfologia (IBGE, 2012; IEF, 2017):

A floresta de terra firme densa de baixo platô (FTFBP) é encontrada a uma altitude de 60 e 100 m, principalmente em latossolo vermelho-amarelo distrófico. Estas florestas são formadas por árvores de copas altas, até 50 m, dominadas por *Eschweilera coriacea* (DC.) SA Mori, *Pouteria caimito* (Ruiz & Pav.) Radlk., *Protium tenuifolium* (Engl.) e *Minquartia Guianensis* Aubl. Atualmente, 190 espécies arbóreas têm potencial valor comercial, formando até 27 ind.ha⁻¹, 133 m³.ha⁻¹ e 48% do volume total de madeira (DAP > 10 cm) (IBGE, 2012; IEF, 2017).

As florestas de terra firme densa submontanas (FTFSm) estão localizadas nas encostas até 320 m, com uma altitude média de 195 m. As espécies arbóreas dominantes são *Eschweilera coriacea* (DC.) S.A. Mori, *Pouteria caimito* (Ruiz & Pav.) Radlk, *Inga auristellae* Harms, *Guarea pubescens* sub sp. *pubiflora* (A. Juss.) TD Penn e *Vouacapoua americana* Aubl, das quais mais de uma centena têm valor comercial, representando 26 ind.ha⁻¹, 142 m³.ha⁻¹ e 49% do volume total (DAP > 10 cm) (IBGE, 2012; IEF, 2017).

Cerrado ou transição cerrado-floresta (TCF) está localizado mais perto da costa, com um dossel uniforme e médio (até 30 m), perene. Cerca de 203 espécies de árvores foram registradas, com maior representação de *Pouteria caimito* (Ruiz & Pav.) Radlk, *Protium decandrum* (Aubl.) March. E *Guarea pubescens* sub sp. *pubiflora* (A. Juss.) T. D. Penn, bem como espécies típicas de Savana, como *Ormosia coccínea* Jacks, *Perebea* sp., *Cheilochlinium cognatum* (Miers) A.C. Sm. 124 espécies arbóreas têm valor comercial, estimado em 48% do volume total por hectare (IBGE, 2012; IEF, 2017).

2.2. Amostragem de árvores caídas e medição de volume comercial do tronco

O inventário de árvores vivas e caídas foi iniciado em 2008 adotando-se o processo de amostragem estratificada em conglomerados. Foram utilizadas 30 unidades de amostra (conglomerados) distribuídas aleatoriamente nos tipos de floresta acima descritos. O número de unidades de amostra é proporcional à área de cada tipo de floresta: 23, 4 e 3 em FTFBP, FTFSm, TCF, respectivamente.

Cada unidade de amostra consiste em 5 unidades secundárias compostas de 4 tiras de 20 x 200 m (unidades terciárias) formando uma cruz alinhada nas quatro direções cardinais. Nas unidades terciárias, um total de 1264 árvores comerciais caídas com diâmetro na altura do peito (DAP, 1,30 m) \geq 10 cm foram medidas. O volume do caule foi obtido adotando-se a metodologia combinada de Smalian e Hohenald (Equação 1), onde o comprimento da base do tronco para o ramo mais baixo (H_c = altura comercial) foi dividido em 10 seções de igual comprimento (LIMA, 2010; LIMA et al., 2014). A circunferência central de cada seção foi medida e, posteriormente, convertida em diâmetro.

$$V_{\text{com}} = \frac{\pi}{4} \times \left\{ \left(\frac{D_0^2 + D_{10}^2}{2} \right) + D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + D_5^2 + D_6^2 + D_7^2 + D_8^2 + D_9^2 \right\} \times \frac{H_c}{10} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que: D_i = Diâmetro da secção; H_c = Altura comercial

2.3 Desenvolvimento de modelos volumétricos

2.3.1 Seleção de dados

Devido às diferenças na composição florística, no tipo de solo e na topografia entre os tipos de floresta, foi desenvolvido primeiro um modelo volumétrico para cada tipo e, além disso, combinou-se todos os dados para a obtenção de uma equação genérica. Foram testados dois modelos volumétricos baseados apenas no dap e duas combinações de dap e H_c (Tabela 1) comumente usado para estimar o volume do tronco na região (SILVA et al., 1984; BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009; HIGUCHI et al., 2015).

Tabela 1. Modelos volumétricos utilizados para representar a volumetria nas diferentes áreas da Floresta Estadual do Amapá.

Autor	Modelo	Variáveis
Hohenald–Krenn	$\text{Vol} = \beta_0 + \beta_1 \cdot D + \beta_2 \cdot D^2 + \varepsilon$	$V=f(\text{DAP})$
Husch	$\text{Vol} = \beta_0 \cdot D^{\beta_1} \cdot \varepsilon$	$V=f(\text{DAP})$
Spurr (1952)	$\text{Vol} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (D^2 H) + \varepsilon$	$V=f(\text{DAP}, H_c)$
Schumacher–Hall (1933)	$\text{Ln}(\text{Vol}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln}(D) + \beta_2 \cdot \text{Ln}(H) + \varepsilon$	$V=f(\text{DAP}, H_c)$

Nota: β_i = parâmetros a serem estimados; D = diâmetro medido a 1,30 m do comprimento do tronco (DAP); H = altura comercial em metros; Vol = volume comercial com casca em metros cúbicos; ε = erro aleatório.

Os parâmetros dos modelos de Hohenald–Krenn, Spurr e Schumacher-Hall foram estimados por meio do método dos mínimos quadrados (MMQ). O modelo não linear de Husch foi ajustado por meio da modificação do algoritmo Levenberg-Marquardt por meio do pacote *minipack.lm*. De modo geral, os parâmetros foram calculados usando a população total de árvores amostradas em cada área e são assumidos como os verdadeiros parâmetros que representam a volumetria em cada sítio. No entanto, foram extraídas amostras do conjunto de dados completo para avaliar a influência do tamanho da amostra (número de árvores) nos parâmetros

ajustados (validação cruzada). Para representar seleções aleatórias e seleções estratificadas de árvores, foram utilizadas duas estratégias de amostragem descritas no tópico 2.4: (1) amostragem aleatória e (2) amostragem aleatória estratificada. Todas as computações e análises foram realizadas utilizando o software estatístico R® (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2015).

As equações obtidas foram analisadas por meio de comparações de critérios estatísticos (VANCLAY, 1994; SCHNEIDER et al., 2009) obtidos conforme as Equações 2, 3, 4 e 5.

– Critério de Informação de Akaike (AIC):

$$AIC = -2LL + 2k \quad \text{Eq. (2)}$$

em que: LL é a log-verossimilhança e k é o número de parâmetros do modelo. Este critério penaliza a adição de parâmetros nos modelos analisados. Indica a qualidade do ajuste pelas equações. A melhor equação minimiza o valor do AIC.

– Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}):

$$R^2_{aj} = R^2 - \left[\frac{k-1}{n-k} \right] \times (1-R^2) \quad \text{Eq. (3)}$$

em que: R^2 = coeficiente de determinação; n = número de observações; k já definido anteriormente. Por esse critério, quanto mais próximo de um (1,0) ou 100 % for o valor do coeficiente de determinação ajustado, maior será a variação total dos dados explicada pela equação.

– Raiz quadrada do erro médio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. (4)}$$

em que V_i é o volume comercial com casca individual (i); \hat{V}_i é a estimativa dos volumes e n , o número total de observações. A raiz quadrada do erro médio indica a diferença média quadrática entre os valores observados e estimados. Quanto menor o RMSE, melhor a precisão da estimativa (MEHTÄTALO et al., 2006).

- Bias:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n} / \bar{V} \quad \text{Eq. (5)}$$

Esta estatística indica uma tendência de sub ou superestimação, sendo uma medida de erro e medida de qualidade nas predições realizadas, de modo que, quanto menor o erro, maior a eficiência nas generalizações.

2.4 Tamanho mínimo da amostra para para capturar a heterogeneidade regional

2.4.1 Amostragem aleatória

De forma iterativa foram geradas amostras do conjunto de dados totais e de árvores com DAP maior que 50 cm, selecionando aleatoriamente um número de amostra aumentando em 2%, 5%, 10%, 20%, 50%, e 70% do número total de árvores. Para cada conjunto de árvores amostradas aleatoriamente, seguiu-se o procedimento de montagem do modelo usado para a estimativas genéricas para a Flota, conforme descrito no tópico 2.3. À medida que a amostragem aleatória produz parâmetros ajustados altamente variáveis, iteramos a amostragem aleatória 1000 vezes para cada tamanho de amostra e calculamos o parâmetro médio nas 1000 iterações para produzir uma estimativa média única de β_0 (o parâmetro angular constante) e β_1 e β_2 (parâmetros variáveis) para cada tamanho de amostra.

2.4.2 Amostragem aleatória estratificada

Na tentativa de simular uma abordagem mais realista para amostragem no campo, foi aplicada uma técnica em que as árvores amostradas são agrupadas espacialmente. Foi adotado um esquema de amostragem estratificada que é aproximadamente representativo da mensuração do campo (DUNCANSON et al., 2015). Nesta abordagem, foram simuladas a amostragem considerando os dados gerais e também para as árvores com DAP ≥ 50 cm. Neste procedimento, também foram selecionados aleatoriamente árvores, tomadas nos 2, 5, 10, 20, 50 e 70 percentis dos dados. O tamanho da amostra é aumentado selecionando-se árvores aleatoriamente, tanto dos dados totais quando das árvores com DAP ≥ 50 cm, até se obter as menores medidas de erro e viés na calibração do modelo. Assim, para cada tamanho de amostra, os dados são agrupados e armazenados, e um modelo está apto a seguir os métodos para predições volumétricas.

2.5 Fator de Forma

O fator de forma (FF) é o mais simples método usado na estimativa de volume. É a razão entre o volume real da árvore e o volume de um sólido geométrico (cilindro)

que possua um diâmetro e altura iguais ao da árvore (SILVA; PAULA NETO 1979, BURKHART; TOMÉ 2012). O volume real é o volume obtido da cubagem rigorosa. O volume cilíndrico (V_{cil}) das árvores foi estimado em primeiro lugar: $V_{cil} = g \cdot h$, em que g é a área basimétrica da árvore e h é a altura comercial. O fator de forma (fator de forma real ou verdadeiro) foi estimado para cada tipologia florestal (FF local) e posteriormente usado na predição volumétrica.

2.6 Predições volumétricas

As estimativas em nível da árvore dos modelos alternativos desenvolvidos em outras regiões na Amazônia (CTS_{ALT}) e fator de forma local (FF), foram comparadas às estimativas da melhor equação derivada localmente (considerada como referência, CTS_{REF}) (Tabela 2).

Tabela 2. Equações publicadas usadas para comparação na predição de CTS. Todos os modelos são da forma: $\ln(\text{Vol}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(D) + \beta_2 \cdot \ln(Hc) + \varepsilon$

Equação	CTS_{ALT}	β_0	β_1	β_2	R^2	RSE
1	Thaines et al. (2010) – (Amazonas)	-9,5452	2,1284	0,7221	0,92	0,7048
2	Silva e Santana (2014) – (Pará)	-9,5084	2,0139	0,8788	0,94	0,1103
3	Silva et al. (1984) – (Pará)	-8,8610	1,9318	0,7868	0,96	0,6294

Para cada equação, o viés do modelo (RSE) e o coeficiente de variação do nível da árvore (CV) foram definidos conforme Equações 6, 7 e 8.

$$RSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [CTS_{ALTi} - CTS_{REFi}] / CTS_{REFi} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$CTS_{(j)} = \frac{1}{N_{(j)}} \sum_{i \in (j)} CTS_{REF}(i) \quad \text{Eq. (7)}$$

$$CV(j)\% = \frac{RSE(j)}{CTS_{(j)}} \times 100 \quad \text{Eq. (8)}$$

em que: CTS_{ALTi} e CTS_{REFi} são a estimativa de volume da árvore i em tipo de floresta j obtendo as equações alternativas e de referência, respectivamente. Um grande valor de CV (j) seria aceitável desde que o viés seja baixo, porque, em geral, o modelo é aplicado a muitas árvores dentro de um sítio e, portanto, erros aleatórios tendem a se anular (CHAVE et al., 2014).

Na segunda parte da validação, as predições volumétricas foram realizadas considerando os dados do inventário de árvores vivas da Flota. Assim, para verificar as taxas de inferência e discrepância na estimativa do volume médio, os intervalos de confiança de cada tipologia e área total foram estimados pelas melhores equações locais, pelo fator de forma local e pelo fator de forma utilizado nos planos de manejo da região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os dados dendrométricos obtidos, têm-se menores amplitudes de variação para o diâmetro e altura considerando as diferentes áreas. Além disso, os valores de média e mediana para estas variáveis corroboram para uma distribuição com menor assimetria quando comparados com o volume. Setenta e cinco por cento (75%) dos dados de diâmetro e altura para todas as áreas estão concentrados entre 25 – 53 cm e 8 – 15 m respectivamente. O maior volume comercial por árvore foi encontrado na área FTFBP (16,1 m³) entretanto, apresentou menor erro padrão da média. Muito embora a amplitude dendrométrica seja diferente da área total, estes resultados foram obtidos sem a eliminação de *outliers* para cada área (Tabela 3).

Quanto ao diagrama de dispersão e correlação (Figura 2), em todas as áreas os coeficientes de correlação foram altamente significativos, sugerindo uma relação probabilística ($p \leq 0,01$) entre o volume e o conjunto de variáveis preditoras. Embora significativos, os menores valores de correlação foram encontrados para a variável altura em todas as áreas. Os maiores valores de correlações significativas entre as variáveis diâmetro indicam a possível presença de multicolinearidade ou intercorrelação. A distribuição das variáveis (histogramas) em todas as áreas sugere um pequeno desvio da normalidade, principalmente para os diâmetros e volumes. Distribuições mais assimétricas são observadas para os volumes e variáveis dap e dap².hc.

Entre os quatro modelos volumétricos ajustados, os modelos de Schumacher-Hall e Spurr apresentaram melhor desempenho (AIC menor), tanto em nível de floresta total quanto em nível de tipologia (Tabela 4). Estes modelos sugerem que a variância total explicada nas estimativas não seja menor que 95%, produzindo predições confiáveis do volume comercial do tronco (CTS) em todos os casos analisados.

Tabela 3. Estatística descritiva para as variáveis dendrométricas nas diferentes áreas para ajuste e seleção de modelos volumétricos. Nota: N: número de árvores cubadas; Sd: desvio padrão; Epm: erro padrão da média.

Parâmetro	Flota – todos os tipos vegetacionais			Floresta de Terra Firme Densa de Baixo Platô (FTFBP)			Florestas de Terra Firme Densa Submontanas (FTFSm)			Cerrado ou Transição Cerrado-Floresta (TCF)		
	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Volume (m³)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Volume (m³)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Volume (m³)	Diâmetro (cm)	Altura (m)	Volume (m³)
N			1264			855			228			181
Mínimo	10,1	2,4	0,0288	10,1	3,0	0,0248	10,1	3,0	0,0218	10,95	2,4	0,0144
Máximo	189,69	82	16,1	123,4	24,3	16,1	110,7	24,0	12,79	112,35	25	11,2241
1º Quartil	25,47	8,0	0,4217	25,47	8,0	0,4217	25,425	8,0	0,4152	25,425	8,0	0,4152
3º Quartil	53,00	15,3	2,4895	53,00	15,3	2,4895	52,913	15,375	2,4897	52,9125	15,375	2,4985
Média	41,38	12,25	1,9659	42,08	10,83	1,5355	37,20	9,9894	1,3358	38,7781	12,6059	1,6490
Mediana	37,27	11,1	1,0389	34,5	10,2	0,8359	33,73	9,00	0,7422	35,95	12,4	0,9744
Sd	21,11	6,10	2,5037	20,13	4,3027	1,89	18,69	4,4390	1,7551	19,7075	5,0166	1,8945
Epm	0,5618	0,1625	0,0666	0,6884	0,1471	0,0649	1,2382	0,2939	0,1162	1,4648	0,3728	0,1408

Figura 2. Diagrama de correlação de Pearson e distribuição das variáveis dendrométricas para as diferentes áreas. Em que: Vol = é o volume comercial com casca em m³; D = diâmetro ao nível de 1,30 m do solo; H = é a altura comercial. Níveis de significância: **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

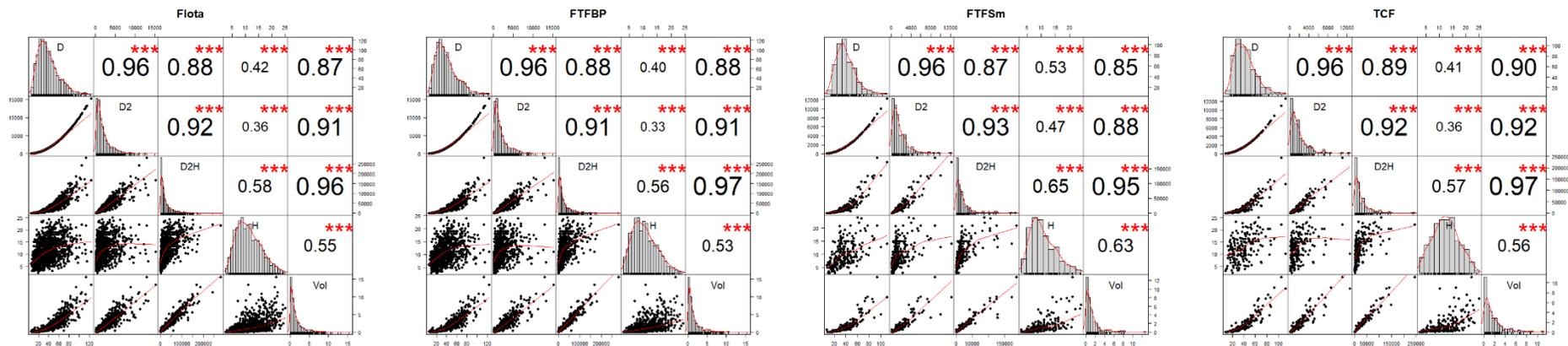


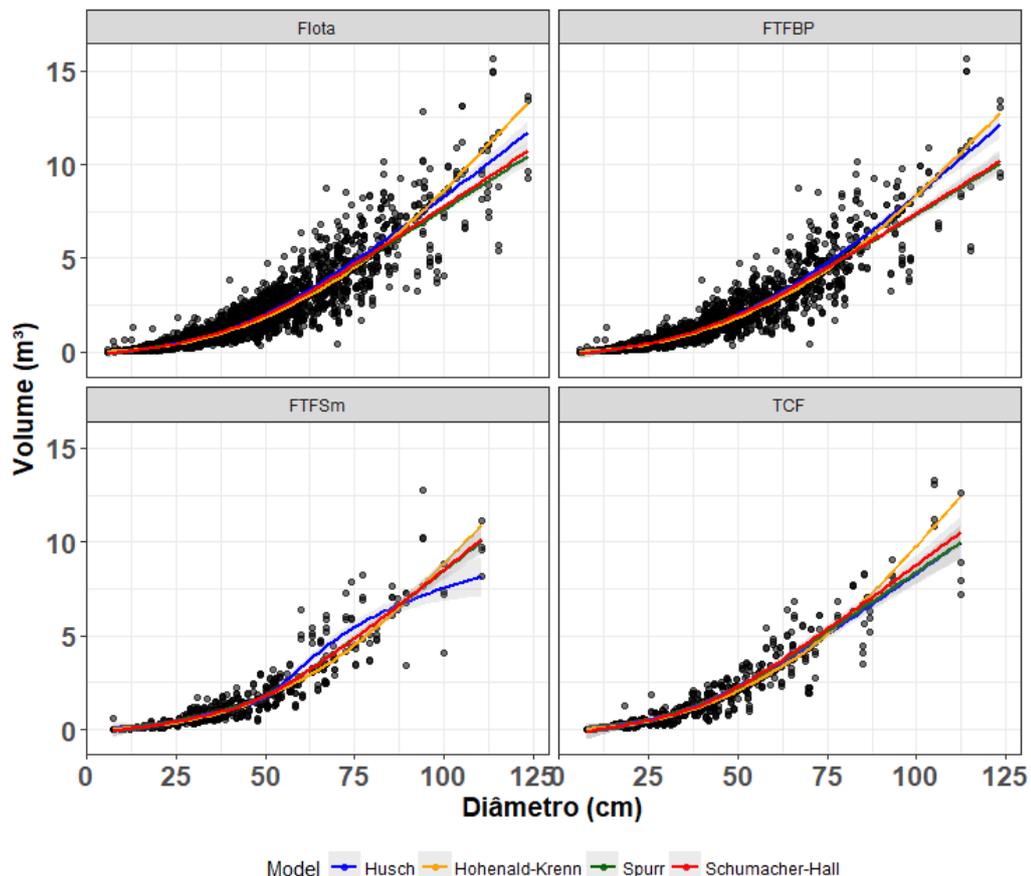
Tabela 4. Resultados estatísticos dos ajustes dos modelos volumétricos para a predição de CTS para as Flota e as diferentes tipologias florestais. Nota: Valores em vermelho indicam coeficientes não significativos ($\alpha = 0,05$).

Área	N árvores	Equações	$\widehat{\beta}_0 \pm SE$	$\widehat{\beta}_1 \pm SE$	$\widehat{\beta}_2 \pm SE$	AIC	RSE	Raj ²	RMSE	Bias
Flota	1264	Husch	-8,031±0,081	2,210±0,023		1471,8697	0,4324	0,8818	0,7966	0,2007
		Hohenald-Krenn	-7,508±0,384	1,898±0,225	0,045±0,033	1471,9276	0,4323	0,8819	0,8160	0,1953
		Spurr	-8,899±0,054	0,925±0,006		263,8647	0,2682	0,9545	0,4881	0,0739
		Schumacher-Hall	-8,889±0,054	1,881±0,016	0,875±0,019	258,5142	0,2675	0,9548	0,4816	0,0677
FTFBP	855	Husch	-7,886±0,097	2,171±0,027		981,4061	0,4285	0,8807	0,7822	0,2022
		Hohenald-Krenn	-7,051±0,461	1,674±0,269	0,072±0,039	980,9673	0,4279	0,8810	0,8118	0,1994
		Spurr	-8,856±0,067	0,922±0,007		202,1298	0,2717	0,9520	0,4764	0,0740
		Schumacher-Hall	-8,843±0,067	1,864±0,019	0,886±0,025	202,8102	0,2715	0,9521	0,4697	0,0746
FTFSm	228	Husch	-8,537±0,190	2,326±0,054		271,5724	0,4342	0,8914	0,8558	0,1888
		Hohenald-Krenn	-7,259±0,878	1,548±0,525	0,115±0,078	270,3358	0,4330	0,8919	0,9399	0,1799
		Spurr	-8,977±0,130	0,932±0,014		88,0837	0,2910	0,9512	0,5312	0,0770
		Schumacher-Hall	-8,986±0,130	1,904±0,044	0,871±0,052	89,6336	0,2907	0,9513	0,5398	0,0733
TCF	181	Husch	-8,019±0,212	2,235±0,059		202,2956	0,4185	0,8874	0,8095	0,1944
		Hohenald-Krenn	-9,738±1,065	3,253±0,621	-0,147±0,089	202,5588	0,4165	0,8884	0,7196	0,1949
		Spurr	-8,999±0,117	0,933±0,012		-38,5122	0,2158	0,9701	0,4726	0,0494
		Schumacher-Hall	-8,984±0,115	1,933±0,033	0,833±0,036	-44,0423	0,2113	0,9713	0,4661	0,0439

Em que: Flota = todos os tipos vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta; $\widehat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 0, \dots, 2$); SE = erro médio; AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; Raj² = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio.

Muito embora a estimativa do volume individual seja similar para a faixa de árvores com até 50 cm de diâmetro para todos os quatro modelos nas diferentes tipologias e Flota (Figura 3), estes modelos tendem a subestimar o CTS em menos de 10% (bias = 0,0739 e 0,0677). Essa similaridade desapareceu para árvores na faixa de dap > 60 cm, sendo mais evidente na tipologia FTFBP.

Figura 3. Comparação na predição de volume comercial estimado (CTS) para a Floresta Estadual do Amapá e as diferentes tipologias florestais a partir das equações de volume de Husch, Hohenald-Krenn, Spurr e Schumacher-Hall. Em que: Flota = todas os tipos vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta.



Para as demais tipologias e Flota fica evidente as diferentes estimações de CTS individuais a partir de 80 cm de dap. Devido a grande diferença nos valores de altura comercial para uma mesma faixa de dap (e baixa correlação entre ambas, Figura 2), não seria viável recomendar modelos com apenas a variável dap como

preditora, por acomodar os maiores vieses de estimativa (RSE) e maiores valores de AIC.

Em comparação com o modelo de Schumacher-Hall, o modelo de melhor ajuste, excluindo a altura comercial como preditora, têm-se um $AIC = 1471$ e $Raj^2 = 0,88$, que são significativamente mais pobres do que o modelo de Spurr. Assim, conclui-se que a altura comercial é importante variável preditora do volume comercial, especialmente quando os tipos de vegetação são considerados.

Para comparar mais diretamente a influência do tipo de vegetação nos modelos, também foi realizado uma análise de variância considerando efeitos fixos (dap e altura) e aleatórios (tipo de vegetação) na estimativa de CTS. Com a inclusão do fator tipo de vegetação (FT), o efeito das tipologias não foi significativo e os intervalos de confiança sugerem sobreposição nos valores (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados estatísticos dos ajustes dos modelos considerando as diferentes tipologias florestais como variável nos modelos (efeitos aleatórios). Nota: Valores em vermelho indicam coeficientes não significativos ($\alpha = 0,05$).

Estatística	Equações genéricas			
	Husch + FT	Hohenald-Krenn + FT	Spurr + FT	Schumacher e Hall + FT
$\hat{\alpha}_0 \pm IC$	-8,02 [-8,10; -7,94]	-7,53 [-7,91; -7,14]	-8,90 [-8,95; -8,85]	-8,88 [-8,10; -7,94]
$\hat{\alpha}_1 \pm IC$	2,21 [2,19; 2,23]	1,91 [1,67; 2,13]	0,93 [0,92; 0,93]	1,89 [1,86; 1,90]
$\hat{\alpha}_2 \pm IC$	2,18 [2,16; 2,21]	0,04 [0,01; 0,08]	0,92 [0,92; 0,93]	0,88 [0,86; 0,90]
$\hat{\alpha}_3 \pm IC$	2,24 [2,21; 2,26]	0,04 [0,00; 0,07]	0,92 [0,92; 0,93]	0,87 [0,84; 0,89]
$\hat{\alpha}_4 \pm IC$		0,05 [0,02; 0,08]		0,87 [0,85; 0,89]
AIC	1453,65	1453,66	264,18	258,93
SER	0,4290	0,4288	0,2680	0,2673
Raj^2	0,8837	0,8837	0,9546	0,9548

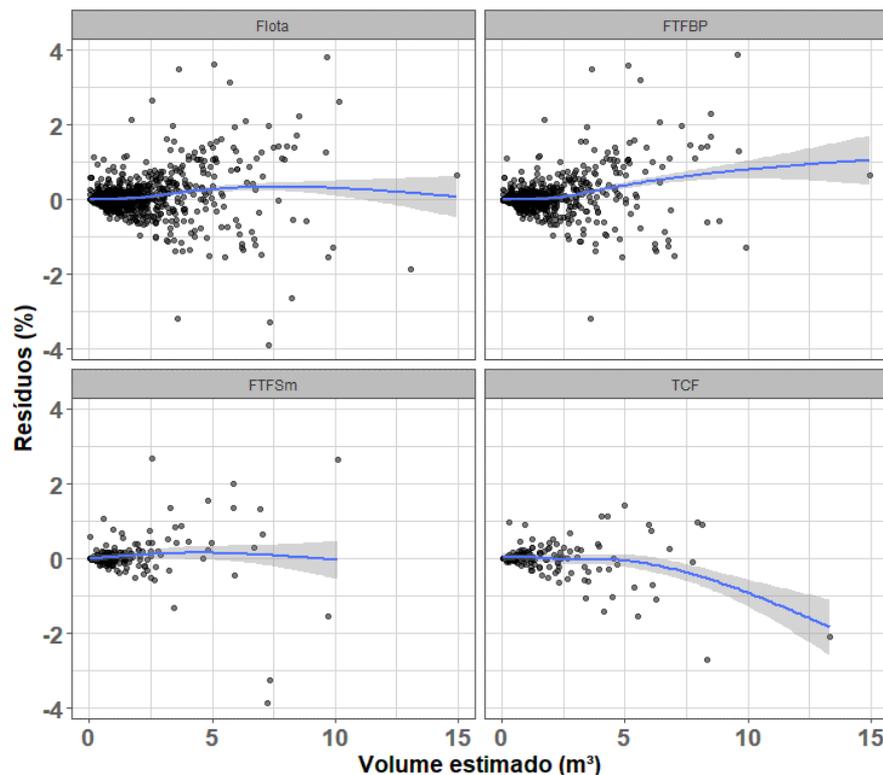
FT = Fator tipo de vegetação; $\hat{\alpha}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 4$); IC = intervalo de confiança; AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; Raj^2 = Coeficiente de determinação ajustado.

Nota-se ainda que a variância total explicada pelos modelos de Spurr e Schumacher-Hall é superior a 95%, não sendo diferente para os resultados obtidos dos ajustes dos mesmos modelos sem o fator FT (Tabela 4). Nesses modelos mistos gerados, o erro de estimativa (RSE) é uma medida do quanto a variabilidade da variável dependente - volume - é devida aos efeitos aleatórios que está sendo analisado (os interceptos das tipologias e os resíduos). Muito embora os modelos ajustados especificamente por tipo de floresta apresentem AIC menor em relação as equações obtidas para a área total, o melhor desempenho reportado pela equação de Schumacher-Hall, quando incluído o fator tipologia, não indica necessariamente a necessidade de estratificação para gerar equações específicas para cada local (AIC

= 258,51 < 258,93). Estes resultados sugerem, portanto, que é mais parcimonioso manter um modelo volumétrico único, nesse caso o modelo de Schumacher-Hall obtido para a Flota.

A equação de Schumacher e Hall selecionada para a Flota e para diferentes tipologias prediz que a transformação logarítmica do diâmetro e da altura da árvore para um determinado volume diminui o viés na estimativa. A forma funcional das equações testadas é biologicamente consistente, principalmente com a inclusão da variável altura e esses resultados podem ser ilustrados na distribuição residual para cada caso (Figura 4).

Figura 4. Distribuição residual para a melhor equação local (Schumacher-Hall) obtida para a Floresta Estadual do Amapá e demais tipologias florestais. Em que: Flota = todas os tipos vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta.



Quanto ao tamanho de amostra mínima, existem três tendências importantes visíveis na Figura 5 e Tabela 6. Primeiro, à medida que o tamanho da amostra aumenta, os erros na estimativa de CTS diminuem e também porque um maior

número de árvores grandes ($dap \geq 50$ cm) são amostradas. Em segundo lugar, a amostragem estratificada produz menores erros de estimativas de CTS do que a amostragem aleatória para metade do tamanho da amostra (50%), garantindo que algumas árvores pequenas e algumas grandes sejam incluídas em cada amostra. No entanto, a amostragem estratificada produz uma subestimação comparável ou ligeiramente inferior para tamanhos de amostra maiores (10%). Em terceiro lugar, existe uma variabilidade considerável nas estimações de CTS para a área, e essa variabilidade também diminui com o aumento do percentual do tamanho da amostra.

Figura 5. Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) e Bias de estimativa de volume comercial estimado (CTS) usando diferentes percentis do tamanho dos dados para ajuste e validação dos modelos volumétricos. Em que: 1 = todas as árvores considerando amostragem estratificada; 2 = árvores com $DAP \geq 50$ cm considerando amostragem estratificada; 3 = árvores com $DAP \geq 50$ cm considerando amostragem aleatória.

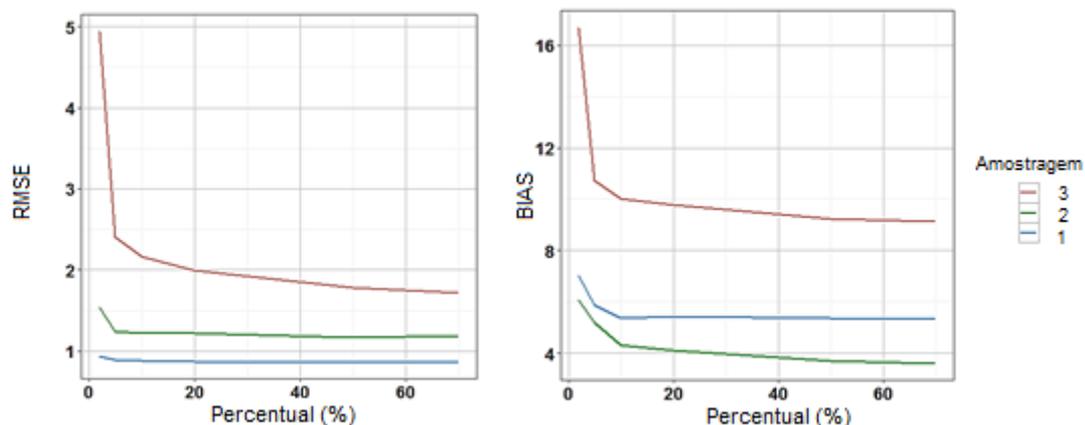


Tabela 6. Principais medidas de erro da estimativa de volume comercial estimado (CTS) obtidas após o ajuste da equação local em função do tamanho da amostra, utilizando amostragem aleatória e estratificada considerando todas as árvores e árvores com $DAP \geq 50$ cm.

RMSE	RSE	CV (%)	Bias (%)	Amostragem	Percentil
0,9349784	0,3508999	51,14599	7,040463	1	2
0,8898628	0,3611319	48,67803	5,869198		5
0,8782242	0,3655396	48,04137	5,38724		10
0,8682147	0,3698600	47,49382	5,428386		20
0,8647003	0,3707578	47,30157	5,37364		50
0,8651000	0,3716398	47,32343	5,323261		70
1,5348533	0,2922285	36,28754	6,091614	2	2
1,2418508	0,3115672	29,36027	5,193097		5

1,2171913	0,3226051	28,77726	4,313391	10
1,2148483	0,3337047	28,72187	4,118247	20
1,171805	0,3360312	27,70422	3,712013	50
1,1854266	0,3405843	28,02627	3,622504	70
4,9417953	0,2579813	111,96217	16,673289	2
2,4049415	0,3034673	54,48677	10,724535	5
2,1640667	0,3182498	49,02947	10,011458	10
1,9889895	0,3232444	45,06289	9,763637	20
1,7830319	0,3365555	40,39668	9,247775	50
1,7143655	0,3388417	38,84096	9,150426	70

Em que: RMSE = raiz quadrada do erro médio; RSE = viés do modelo; CV = coeficiente de variação; 1 = todas as árvores considerando amostragem estratificada; 2 = árvores com DAP \geq 50 cm considerando amostragem estratificada; 3 = árvores com DAP \geq 50 cm considerando amostragem aleatória.

A amostragem estratificada produz menores erros de estimação quando se considera todas as árvores e aproxima-se de uma tendência a zero, com um tamanho de amostra de 70%, enquanto que 70% das amostras mantêm uma superestimação menor que 4% no CTS de árvores com DAP \geq 50 cm para a abordagem considerando amostragem aleatória.

O fator de forma médio para a área total foi estimado em 0,93 (Figura 6), similar ao encontrado especificamente para FTFBP e inferior ao reportado por FTFSm. O menor fator de forma médio foi obtido para TCF, muito embora seja superior aos fatores de forma sugerido para a Amazônia (0,7) e para os planos de manejo no Amapá (0,55). Para eliminar a variância do erro e evitar o excesso de estimativa comum com o uso de valores médios, em todos os casos os fatores de forma foram estimados para cada fuste antes de se obter a média para as diferentes áreas.

Para a Flota e FTFBP, os fatores de forma obtidos para cada árvore mostraram que 50% são inferiores a 93. Muito embora a área TCF reporte maior variabilidade nos fustes, o fator de forma médio obtido é similar a mediana da distribuição, evidenciando um comportamento mais simétrico principalmente.

Quanto a predição de volume geradas pelas CTS_{ATL} comparadas com a CTS_{REF} (Tabela 7 e Figura 7), percebe-se estimativas com maior variação para o fator de forma local em todos os casos. No entanto, o uso de tais alternativas não invalida as predições para a Flota e para as diferentes tipologias, pois correlações significativas entre as predições final mostraram evidências de rejeição da hipótese nula ($p < 0,01$).

Figura 6. Box-plot para os valores de Fator de forma (FF) obtido para as diferentes áreas. Os pontos pretos com as margens dentro das caixas indicam o fator de forma médio; as linhas dentro das caixas indicam a mediana. Em que: Flota = todas os tipos

vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta.

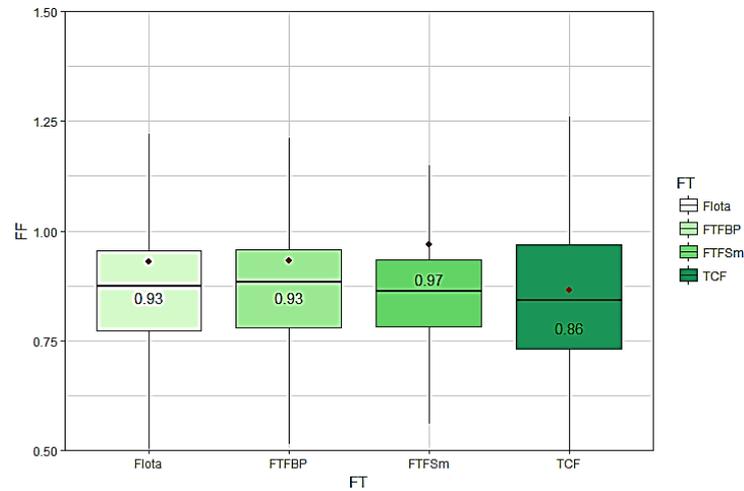
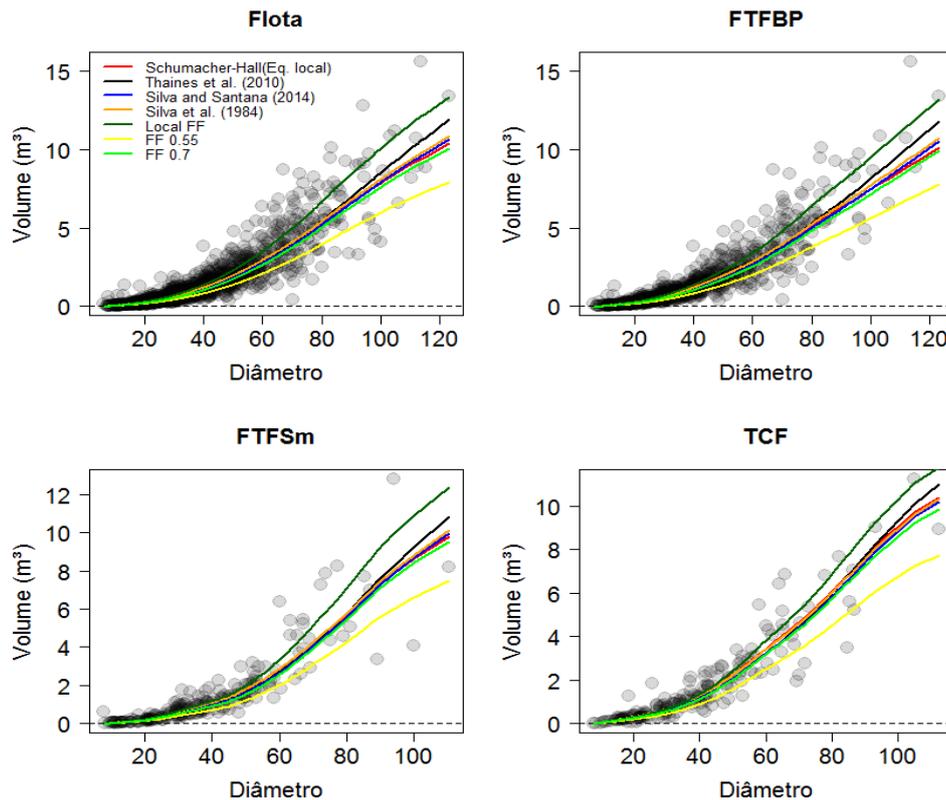


Tabela 7. Correlações e erros de estimativa de volume comercial estimado (CTS) em nível da árvore comparados com as equações de referência locais.

Área	Autores	Validação		
		Pseudo-R ²	Viés do Modelo (RSE)	Coefficiente de Variação (%)
Flota	Thaines et al. (2010)	0,9949	0,0368	2,3545
	Silva e Santana (2014)	0,9959	0,0373	2,3843
	Silva et al. (1984)	0,9992	0,1780	11,3841
	Fator de forma local	0,9878	0,2592	16,5744
FTFBP	Thaines et al. (2010)	0,9938	0,1170	7,8366
	Silva e Santana (2014)	0,9958	0,1172	7,8505
	Silva et al. (1984)	0,9992	0,2649	17,7388
	Fator de forma local	0,9872	0,3825	25,6105
FTFSm	Thaines et al. (2010)	0,9910	0,1296	11,5064
	Silva e Santana (2014)	0,9962	0,1062	9,4287
	Silva et al. (1984)	0,9990	0,2866	25,4490
	Fator de forma local	0,9946	0,2645	23,4810
TCF	Thaines et al. (2010)	0,9941	0,0904	5,4810
	Silva e Santana (2014)	0,9768	0,1207	7,3134
	Silva et al. (1984)	0,9842	0,2577	15,6171
	Fator de forma local	0,9597	0,3197	19,3774

Em que: Flota = todas os tipos vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta.

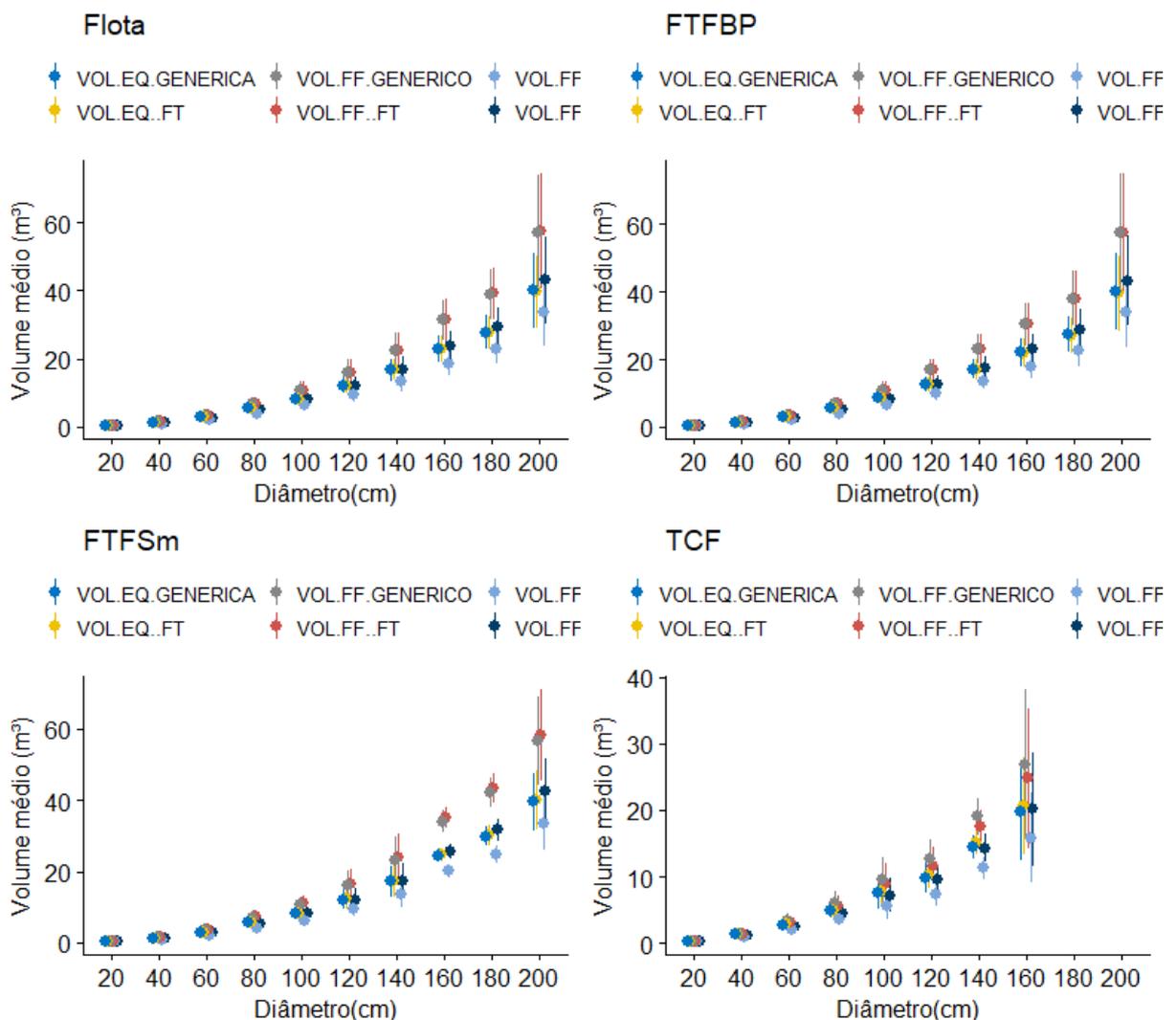
Figura 7. Comparação na predição de volume comercial estimado (CTS) para as diferentes tipologias florestais a partir das equações desenvolvidas em outras regiões na Amazônia. Em que: Flota = todas os tipos vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta.



Em comparação com os modelos locais, os erros médios da estimativa de CTS das alternativas testadas em nível da árvore foram inferiores (Tabela 5), mas a maior disseminação do erro em todos os sítios foi maior para os valores de fator de forma local, 0,55 e 0,7. A maior média de CV (j) em todas as tipologias foi de 16,57% usando o fator de forma local versus o modelo volumétrico local. O viés médio foi de + 0,3825 na tipologia FTFBP, versus o modelo desenvolvido localmente. O fator de forma local tende a superestimar substancialmente o CTS médio ao nível da floresta total e principalmente em FTFBP e FTFSm (viés > 25%). Quando se utiliza os fatores de forma 0,55 e 0,7, nota-se subestimações médias (viés < 30%) em todos os casos analisados. Este viés pode ser explicado pelo tipo de vegetação ou por condições bioclimáticas (Figura 7). Embora estes resultados sugiram não usar o fator de forma, o fator de forma médio local mostrou uma tendência com tipos de floresta em estimar

com maior precisão o CTS individual de árvores de maior porte. No entanto, os valores de CTS_{ALT} obtidas para cada local mostram a importância de desenvolver equações locais, pois quando se utiliza o fator de forma na predição volumétrica de árvores vivas, nota-se tendências de superestimação e maior amplitude de variação para a Floresta Estadual do Amapá (Figura 8).

Figura 8. Comparação na predição volume médio para as diferentes tipologias florestais a partir das equações e fator de forma locais para o inventário de árvores vivas da Floresta Estadual do Amapá. Em que: Flota = todas os tipos vegetacionais; FTFBP = floresta de terra firme densa de baixo platô; FTFSm = florestas de terra firme densa submontanas e TCF = Cerrado ou transição cerrado-floresta.



Quando se considera o inventário de árvores vivas, as comparações de volume médio por meio do intervalo de confiança indicam maiores superestimativas principalmente para classes de diâmetro maior que 100cm, o que se subentende

diferentes amplitudes de altura para árvores de mesmo diâmetro. As equações locais sugerem estimativas de CTS similares em todas as tipologias e área total. A menor estimativa de produção de madeira foi observada para a tipologia TCF, concentrando espécies de menor porte principalmente em termos de dossel.

Teoricamente, a análise de regressão tem sido utilizada com ênfase na solução da maioria dos problemas florestais, especialmente quando se pretende estimar os parâmetros da floresta por meio de relações biométricas (SCHNEIDER et al., 2009; ROBINSON; HAMANN, 2011; LIMA et al., 2014). O uso de modelos de regressão capazes de determinar com precisão a produção florestal, com base na estimativa do volume de madeira, é fundamental para a implementação do manejo sustentável (CLUTTER et al., 1983; BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009; BERGER et al., 2014, McROBERTS; WESTFALL, 2014). Os modelos logarítmicos têm sido utilizados constantemente no estudo das relações biométricas, principalmente para o desenvolvimento de equações para biomassa e volume em florestas naturais (BROWN et al., 1989; CHAVE et al., 2005; SEGURA; KANNINEN, 2005; LITTON; BOONE KAUFFMAN, 2008; BASUKI et al., 2009; McROBERTS; WESTFALL, 2014; McROBERTS et al., 2015).

No entanto, ainda existem algumas dificuldades no manejo florestal, principalmente no que se refere à obtenção confiável do estoque de volume comercial, que depende dos atributos das árvores inventariadas. No artigo 10 da Resolução CONAMA 406/2009, descreve-se que, a partir do segundo Plano Operacional Anual-POA, o cálculo do volume de árvores “em pé” só será aceito por meio de uma equação de volume desenvolvida especificamente para o plano de gerenciamento da área manejada. Outro ponto importante que deve ser considerado para o desenvolvimento de equações está relacionado às variações das unidades florísticas e fisionômicas da região amazônica. Considerando que a classificação da vegetação pode ser explicada por mudanças nos parâmetros estruturais, como riqueza, densidade, frequência e dominância, o desenvolvimento de equações volumétricas considerando diferentes ecossistemas são fundamentais para os planos de manejo florestal na região Amazônica e no Estado do Amapá.

De modo geral, todos os critérios de avaliação estatística revelaram que as equações de dupla entrada sugerem maior precisão estatística, especialmente as equações obtidas do modelo de Schumacher-Hall (1933). A boa distribuição dos erros

em torno da linha de regressão (Figura 4) proporcionando homogeneidade de variância e baixa amplitude residual, corroboram com a escolha das equações de Schumacher e Hall (1933) para todas as áreas. Estes resultados indicam a inclusão da variável altura na estimativa de volume, uma vez que os modelos de simples entrada assumem que as árvores de diferentes diâmetros possuem mesmas alturas (SCHUMACHER; HALL, 1933; REED; GREEN, 1984), o que não é verdade para as florestas naturais na região amazônica (ROLIM et al., 2006).

Em todas as áreas, as equações de dupla entrada selecionadas apresentaram valores de seus coeficientes significativamente diferentes de zero. Assim, em todos os casos recomenda-se que as predições de CTS devem ser obtidas a partir diâmetro e altura, como variáveis explicativas. O baixo viés (RSE, RMSE e Bias), a qualidade (AIC) e a confiabilidade (R^2_{aj}) nas predições de CTS são mais aceitáveis do que aqueles obtidos pelas equações que modelam apenas com diâmetro. Embora uma boa parte da variação no volume tenha sido explicada apenas pelo diâmetro, a melhora foi relativamente significativa quando incluídos a altura. Estes resultados também estão de acordo com estudos realizados em florestas tropicais no Brasil (ROLIM et al., 2006; GIMENEZ et al., 2015; TONINI; BORGES, 2015; HIGUCHI et al., 2015) e em outras regiões de florestas tropicais (FANG; BAILEY, 1999; SEGURA; KANNINEN, 2005; HUAT et al., 2009; GUENDEHOU et al., 2012; IGBINOSA; AMOO, 2014; IGBINOSA; EKPA, 2015; KACHAMBA; EID, 2016).

Muito embora as medidas de altura são mais custosas e demoradas em inventários florestais, o uso de equações hipsométricas são recomendadas para estimar a altura comercial ou total em florestas naturais (SOARES et al., 2011; FELDPAUSCH et al., 2011; AHMADI et al., 2013; ERCANLI et al., 2015). Modelos que incluem a altura da árvore melhoram a estimativa de volume em muitas florestas tropicais e dão suporte para estimativas mais precisas de biomassa e carbono (FELDPAUSCH et al., 2011; RUTISHAUSER et al., 2013).

No entanto, é importante destacar que as formas das árvores predominantes sejam representados entre as árvores da amostra usadas para desenvolver o modelo volumétrico e de relação hipsométrica e (DUNCANSON et al., 2015). Com árvores de amostra apropriados e pequenos erros de medição, a precisão das previsões de volume será, provavelmente, melhorada pela inclusão altura como variável explicativa,

apesar da incerteza adicionado usando um modelo de altura de diâmetro (KACHAMBA; EID, 2016).

Quanto ao tamanho de amostra mínima, em geral, a amostragem estratificada apresentou maior precisão do que a amostragem aleatória quando se considera todas as árvores no ajuste dos modelos. Isso ocorre porque a amostragem aleatória distorce a amostragem para as árvores com $DAP \geq 50$ cm, ocasionando maiores erros nas simulações permitindo uma amostra mais representativa para árvores menores (DUNCANSON et al., 2015).

Concentrando-se nos resultados da amostragem estratificada, uma vez que estes são provavelmente mais representativos da mensuração da floresta, pode-se observar que, com um tamanho de amostra de 70% do total de observações, consiste com a amostragem média obtidos por Jenkins et al. (2003) e Duncanson et al. (2015). Os resultados com maiores erros de estimativa para árvores com $DAP \geq 50$ cm em amostragem aleatória, são prováveis porque estas são consideradas as maiores nos locais, e as superestimativas do CTS aumentarão com o tamanho da árvore. Portanto, embora os parâmetros ajustados do modelo se desviem mais dos valores do nível de cada tipo de floresta, a maior proporção de árvores da amostragem produz uma estimativa de CTS com maior confiabilidade no nível de 70% do área total.

As previsões de CTS_{ALT} para as diferentes áreas (Tabela 5) evidenciam menores tendências nas previsões. Os parâmetros que explicam a forma e perfil do tronco (β_1 e β_2) dos modelos genéricos de Silva et al. (1984), Thaines et al. (2010) e Silva e Santana (2014), não foram significativamente diferentes das estimativas dos parâmetros do modelo escolhido para os locais, principalmente para o modelo linear de Schumacher-Hall. De fato, isto pode indicar que a variação total explicada por tais equações sugere que os padrões ecológicos de diversidade, estrutura e forma do fuste nos diferentes sítios são similares em escala regional e, portanto, para outros sítios específicos podem haver grandes desvios a partir do volume (ABBOT et al., 1997; KACHAMBA; EID, 2016).

Muito embora o fator de forma local reporte ligeira superestimativas de CTS, principalmente para árvores maduras de maior porte ($DAP > 100$ cm), as equações genéricas de outras regiões, utilizando conjuntos de dados locais podem reduzir a incerteza na estimativa de volume comercial nas florestas de terra firme no Amapá. Esses resultados são similares aos que foram obtidos por Rolim et al. (2006), Leite e

Rezende (2010) e Barreto et al. (2014) em diferentes sítios naturais na Região Amazônica, e por Sönmez et al. (2009), Adekunle et al. (2013) e Mate et al. (2015) em diferentes áreas de florestas tropicais na África. O viés das estimativa sugerem uma boa medida de valor preditivo geral de equações de regressão (MAYER; BUTLER, 1993; RYKIEL Jr., 1996; ROBINSON; FROESE, 2004; ROBINSON et al., 2005; AKINDELE; LEMAY, 2006). Draper e Smith (1966) também observaram que é uma medida comum de qualidade de estimativas em modelos de regressão, com baixos valores, indicando melhores predições.

Diferente das predições de CTS pelo fator de forma para a Flota, as predições volumétricas para as árvores vivas sugerem superestimação e maior amplitude de variação quando se consideram os fatores de forma locais. Embora seja comum estimar um fator de forma para diferentes espécies em florestas tropicais (COLPINI et al., 2009; FIGUEIREDO et al., 2009; ADEKUNLE et al., 2013), sua estimativa ou até mesmo do volume para diferentes tipologias ou fitofisionomias florestais ou espécies ainda são escassos (ABBOT et al., 1997; VIBRANS et al., 2015). A faixa de fator de forma médio obtido neste estudo foi de 0,86–0,97, embora pequena, essa variação ocorre devido às diferentes características de composição de espécies e tamanho da árvore. Vários fatores, incluindo genética, condições ambientais e localizações geográficas foram listados como fatores que podem afetar o crescimento e a forma de plantas (SOCHA; KULEJ, 2005; 2007), ocasionando em maiores erros na estimação do volume comercial (ADEKUNLE et al., 2013)

Este trabalho busca preencher a lacuna sobre a validade de equações volumétricas desenvolvidas para florestas tropicais, embora algumas pesquisas já tenham sugerido o desenvolvimento de equações individuais para espécies e tabelas de produção volumétrica para a Amazônia (FERNANDES et al., 1983). A questão atualmente em discussão e que é relatado neste trabalho é se, em outros locais, onde nenhuma equação volumétrica genérica está disponível, seria melhor usar as equações de volume genéricas de outros locais, fator de forma ou desenvolver equações específicas para o local.

Embora o fator de forma seja considerado relevante na estimação do volume na Amazônia, o desenvolvimento de equações é uma importante fonte de precisão nas estimativas de volume nos planos de manejo da região. Entretanto, há falta de orientações para a seleção dos modelos volumétricos existentes e validação de

alternativas. O fator limitante sempre foi a amostragem destrutiva das árvores para o ajuste e seleção de modelos. Estimativas altamente precisas de volumes e biomassa de árvores individuais estão cada vez mais disponíveis por meio tecnologia *Lidar* (ESTORNELL et al., 2011; ESTORNELL et al., 2012). Essas estimativas não exigem a amostragem destrutiva de árvores e podem ser realizadas de forma sistemática no campo (DUNCANSON et al., 2015). Com a amostragem adequada, um sistema poderia ser desenvolvido para amostrar o volume *in situ* da árvore em gradientes ambientais, fornecendo uma solução potencial para problemas pendentes relacionados à biomassa florestal e estoque de carbono.

4. CONCLUSÕES

Estimativas precisas de volume podem ser obtidas pela equação de Schumacher-Hall para as diferentes tipologias e para a Floresta Estadual do Amapá.

Estimativas com intervalos de confiança válidos podem ser obtidas usando apenas uma equação genérica.

Os modelos logarítmicos ajustados compõem ferramentas úteis para prever o volume comercial do tronco (com casca) para as diferentes tipologias florestais no Amapá.

O fator de forma local desenvolvido para cada tipologia e para a Flota, juntamente com o fator de forma empregado nos planos de manejo locais produziram estimativas não menos confiáveis do que equação local, apresentando maiores amplitudes de variação quando usadas para aplicações de grande escala (inventário de árvores vivas), onde estimativas de volume específicas são necessárias.

A estratificação do conjunto de dados por tipo de floresta para o ajuste e seleção do modelo mostrou-se necessária, uma vez que foram encontrados resultados significativos com menores valores de viés e bias para até 70% da base de dados total e também quando se considera apenas árvores com DAP > 50 cm.

Estes resultados podem ser induzidos por gestores, como ferramenta técnica na predição do volume comercial das florestas naturais no Amapá.

Outros estudos devem elucidar os mecanismos para o desenvolvimento de equações específicas em nível de grupo ecológico, famílias, classes de diâmetro e espécies comerciais. Além disso, deve-se considerar as características e variáveis

ambientais de outras tipologias florestais não menos importante no Amapá e na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ABBOT, P.; LOWORE, J.; WERREN, M. Models for the estimation of single tree volume in four Miombo woodland types. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 97, n. 1, p. 25-37, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00036-4).

ADEKUNLE, V. A. J. Non-linear regression models for timber volume estimation in natural forest ecosystem, Southwest Nigeria. **Research Journal of Forestry**, Lagos, v. 1, n. 2, p. 40-54, 2007. <https://doi.org/10.3923/rjf.2007.40.54>.

ADEKUNLE, V. A. J. et al. Models and form factors for stand volume estimation in natural forest ecosystems: a case study of Katarniaghat Wildlife Sanctuary (KGWS), Bahraich District, India. **Journal of Forestry Research**, Harbin, v. 24, n. 2, p. 217-226, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11676-013-0347-8>.

AHMADI, K. et al. Non-linear height-diameter models for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests, Iran. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, Gembloux, v. 17, n. 3, p. 431-440, 2013. Disponível em: <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=10162>. Acesso em: 20 jul. 2017.

AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rainforest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, n. 1-3, p. 41-48, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.022>.

ALTRIELL, D.; BRANTHOMME, A.; TAVANI, R. **Assessing growing stock and stock changes through multi-purpose national forest monitoring and assessment**. Rome: FAO, 2010. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acesso em: 20 jul. 2014.

BARRETO, W. F. et al. Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 34, n. 80, p. 321-329, 2014. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.721>.

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 Ciências Agrárias**, Belém, PA, v. 51, p. 115-126, 2009. Disponível

em: <http://periodicos.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/146>. Acesso em: 14 jul. 2017.

BASUKI, T. M. et al. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 8, p. 1684-1694, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>.

BERGER, A. et al. Effects of measurement errors on individual tree stem volume estimates for the Austrian national forest inventory. **Forest Science**, Washington, v. 60, n. 1, p.14-24, 2014. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-164>.

BLASER, J. et al. Status of tropical forest management 2011. **Tropical Forest UPDATE**, Yokohama, v.20, n. 3, p.2-27, 2011. Disponível em: http://www.itto.int/direct/topics/topics_pdf_download/topics_id=2687&no=0.

BRANDEIS, T. J.; KUEGLER, O.; KNOWE, S. A. **Equations for merchantable volume for subtropical moist and wet forests of Puerto Rico**. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research, 2005. (Southern Research Station. Research Paper, SRS-39). Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/21623>. Acesso em: 12 fev. 2017.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science**, Washington, v. 35, n. 4, p. 381-902, 1989. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/contentone/saf/fs/1989/00000035/00000004/art00003>. Acesso em: 14 jul. 2017.

BUONGIORNO, J.; GILLES J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego: Academic, 2003.

BURKHART H. E.; TOMÉ M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht: Springer, 2012.

CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, Berlin, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, London, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>.

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management**: a quantitative approach. Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1983.

COLPINI, C. et al. 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**, Manaus, AM, v. 39, n.1, p. 97-104, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100010>.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

DUNCANSON, L.; ROURKE, O.; DUBAYAH, R. Small sample sizes yield biased allometric equations in temperate forests. **Scientific Reports**, New York, v. 5, article 17153, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep17153>.

ERCANLI, I.; GUNLU, A.; BAŞKENT, E. Z. Mixed effect models for predicting breast height diameter from stump diameter of Oriental beech in Göldag. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 72, n. 3, p. 245-251, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0225>.

ESTORNELL, J. et al. Estimation of biomass and volume of shrub vegetation using LiDAR and spectral data in a Mediterranean environment. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 46, p. 710-721, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.023>.

ESTORNELL, J. et al. Estimation of shrub biomass by airborne LiDAR data in small forest stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 9, p. 1697-1703, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.026>.

FANG, Z.; BAILEY, R. L. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. **Forest Science**, Washington, v. 45, n. 1, p. 85-100, 1999. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/saf/fs/1999/00000045/00000001/art00011>. Acesso em: 14 jul. 2014.

FELDPAUSCH, T. R. et al. Height–diameter allometry of tropical forest trees. **Biogeosciences**, Munich, v. 8, p. 1081-1106, 2011. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011>.

FERNANDES, N. P.; JARDIM, F. C. S.; HIGUCHI, N. Tabela de volume para uma floresta de terra firme da estação experimental de silvicultura tropical. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 13, n. 3-4, p. 537-545, 1983. <https://doi.org/10.1590/1809-439219831334537>.

FIGUEIREDO, E. O.; SCHROEDER, R.; PAPA, D. A. **Fatores de forma para 20 espécies florestais comerciais da Amazônia**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2009. (Embrapa Acre. Comunicado Técnico, 173). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/697548/1/cot173.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2017.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1992.

GIMENEZ, B. O. et al. Equações volumétricas para espécies comerciais madeireiras do sul do estado de Roraima. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 43, n. 106, p. 291-301, 2015. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=05&Number=106&p=s>. Acesso em: 22 dez. 2016.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A. M. **Inventários florestais na Amazônia**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura; Serviço Florestal; Setor de Inventários Florestais, 1963. (Boletim do Serviço Florestal, 6). Disponível em: http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i00022470_001.pdf. Acesso em: 22 jan. 2017.

HIGUCHI, F. G. et al. The use of natural fallen trees in mature tropical amazonian forest for volumetric regression analysis and volume equations adjustment. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Amman, v. 9, n. 31, p. 342-348, 2015. Disponível em: <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2015/September/342-348.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2016.

HUAT, O. K.; TSAI, L. M.; CHUBO, J. K. Juvenile stem volume equations for planted *Azadirachta excelsa* in the state of Johore, Peninsular Malaysia. **Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science**, Selangor, v. 32, n. 2, p. 133-141, 2009. Disponível em: [http://www.pertanika.upm.edu.my/Pertanika%20PAPERS/JTAS%20Vol.%2032%20\(2\)%20Aug.%202009/08%20Pages%20133-141.pdf](http://www.pertanika.upm.edu.my/Pertanika%20PAPERS/JTAS%20Vol.%2032%20(2)%20Aug.%202009/08%20Pages%20133-141.pdf). Acesso em: 10 jul. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2012. (IBGE. Manuais Técnicos em Geociências, 1). Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2017.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DO AMAPÁ - IEF. **Plano anual de outorga florestal do estado do Amapá – PAOF 2017**. Macapá, AP: IEF, 2017. Disponível em: <https://ief.portal.ap.gov.br/dados.php?d=756&a=460>. Acesso em: 3 jan. 2017.

IGBINOSA, A. H.; AMOO, O. B. Appropriate volume functions for leguminosae family in two tropical rainforests in cross River State, Nigeria. **Journal of Environment and Ecology**, Las Vegas, v. 5, n. 2, p. 206-221, 2014. <https://doi.org/10.5296/jee.v5i2.6742>.

IGBINOSA, A. H.; EKPA, N. E. Modelling tree volume in tropical rainforest of Afi river forest reserve in cross river state, Nigeria. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, New Delhi, v. 6, n. 12, p. 546-556, 2015. Disponível em: <https://www.ijser.org/paper/MODELLING-TREE-VOLUME-IN-TROPICAL-RAINFOREST-OF-AFI-RIVER-Forest-RESERVE-IN-CROSS-RIVER-STATE-NIGERIA.html>. Acesso em: 28 jul. 2017.

IIDA, Y. et al. Tree architecture and life-history strategies across 200 co-occurring tropical tree species. **Functional Ecology**, London, v. 25, n. 6, p. 1260-1268, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01884.x>.

JENKINS, J. C. et al. National-scale biomass estimators for United States tree species. **Forest Science**, Washington, v. 49, n. 1, p. 12-35, 2003. Disponível em: https://www.fs.fed.us/ne/durham/4104/papers/Heathbiomass_eqns.pdf. Acesso em: 20 jul. 2014.

KACHAMBA, D. J.; EID, T. Total tree, merchantable stem and branch volume models for miombo woodlands of Malawi. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Howick, v. 78, n. 1, p. 41-51, 2016. <https://doi.org/10.2989/20702620.2015.1108615>.

LEITE, F. S.; REZENDE, A. V. Estimativa do volume de madeira partindo do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 20, n. 1, p. 71-82, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050981762>.

LIMA, A. J. N. **Avaliação de um sistema de inventário florestal contínuo em áreas manejadas e não manejadas do estado do Amazonas (AM)**. 2010. 183 f. Tese (Doutorado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) - Universidade Federal do Amazonas. Disponível em: <http://bdtd.inpa.gov.br/handle/tede/1196>. Acesso em: 20 jul. 2017.

LIMA, A. J. N. et al. Allometric models for estimating above–and below–ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro,

Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 277, p.163-172, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.028>.

LIMA, R. B. et al. Volumetria e classificação da capacidade produtiva para *Mora paraenses* (Ducke) no estuário amapaense. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 42, n. 101, p. 141-154, 2014. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=13&Number=101>. Acesso em: 20 jul. 2017.

LINES, E. R. et al. Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. **Global Ecology and Biogeography**, London, v. 21, n. 10, p.1017-1028, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00746.x>.

LITTON, C. M.; BOONE KAUFFMAN, J. Allometric models for predicting aboveground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. **Biotropica**, London, v. 40, n. 3, p. 313-320, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00383.x>.

MATE, R.; JOHANSSON, T.; SITOIE, A. Stem volume equations for valuable timber species in Mozambique. **Journal of Sustainable Forestry**, Oxford, v. 34, n. 8, p. 787-806, 2015. <https://doi.org/10.1080/10549811.2015.1039043>.

MAYER, D. G.; BUTLER, D. G. Statistical validation. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 68, n. 1-2, p. 21-32, 1993. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90105-2).

McROBERTS, R. E. et al. A general method for assessing the effects of uncertainty in individual-tree volume model predictions on large-area volume estimates with a subtropical forest illustration. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 45, n. 1, p. 44-51, 2015. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0266>.

McROBERTS, R. E.; WESTFALL, J. A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume estimates. **Forest Science**, Washington, v. 60, n. 1, p. 34-42, 2014. Disponível em: https://www.fs.fed.us/nrs/pubs/jrnl/2014/nrs_2014_mcroberts_001.pdf. Acesso em: 20 jul. 2017.

MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M.; KANGAS, A. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 3, p. 501-516, 2006. Disponível em: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf403501.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

NOGUEIRA, E. M. et al. Tree height in Brazil's "arc of deforestation": shorter trees in south and southwest Amazonia imply lower biomass. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 2963-2972, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.002>.

PAYN, T. et al. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 352, p. 57-67, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 10 jul. 2016.

RABELO, B. V. et al. **Macrodiagnóstico do Estado do Amapá**: primeira aproximação do ZEE. 3. ed. Macapá, AP: IEPA, 2008. Disponível em: <http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2017.

REED, D. D.; GREEN, E. J. Compatible stem taper and volume ratio equations. **Forest Science**, Washington, v. 30, n. 4, p. 977-990, 1984. Disponível em: <https://academic.oup.com/forestscience/article-pdf/30/4/977/22621801/forestscience0977.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

ROBINSON, A. P.; FROESE, R. E. Model validation using equivalence tests. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 176, n.3-4, p. 349-358, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.013>.

ROBINSON, A. P.; HAMANN, J. D. **Forest analytics with R**: a introduction. New York: Springer, 2011.

ROLIM, S. G. et al. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672006000100013>.

ROMA, J. C.; ANDRADE, A. L. C. Economia, concessões florestais e a exploração sustentável de madeira. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, Brasília-DF, v. 8, p. 91-96, 2013. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5614/1/BRU_n08_economia.pdf. Acesso em: 10 jun. 2017.

RUTISHAUSER, E. et al. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 307, p. 219-225, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.013>.

RUTISHAUSER, E. et al. Tree height reduction after selective logging in a tropical forest. **Biotropica**, London, v. 48, n. 3, p. 285-289, 2016. <https://doi.org/10.1111/btp.12326>.

RYKIEL JUNIOR, E. J. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 90, n. 3, p. 229-244, 1996. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00152-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00152-2).

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS, 2009.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber–tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933. Disponível em: <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968352/PDF>. Acesso em: 10 jul. 2017.

SEGURA, M.; KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, London, v. 37, n. 1, p. 2-8, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>.

SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 61, n. 5, p. 631-636, 2014. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461050005>.

SILVA, J. A. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: UFRPE, 1979.

SILVA, J. N. M. et al. Equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, PR, n. 8/9, p. 50-63, 1984. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/5024/1/jnsilva3.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2017.

SOARES, C. P. B. et al. Equações hipsométricas, volumétricas e de *taper* para onze espécies nativas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000600010>.

SOCHA, J.; KULEJ, J. M. Provenance–dependent variability of *Abies grandis* stem form under mountain conditions of Beskid Sadecki (southern Poland). **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 11, p. 1-14, 2005. <https://doi.org/10.1139/x05-167>.

SOCHA, J.; KULEJ, J. M. Variation of the tree form factor and taper in European larch of Polish provenances tested under conditions of the Beskid Sadecki mountain range (southern Poland). **Journal of Forest Science**, Prague, v. 53, n. 12, p. 538-547, 2007. Disponível em: <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/00532.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2015.

SÖNMEZ, T.; ERCANLI, I.; KELE, S. A distance–independent basal area growth model for oriental spruce (*Picea orientalis* (L.) Link) growing in mixture with oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Artvin Region, North East Turkey. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 4, n. 8, p. 740-751, 2009. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/47BDC4C38105>. Acesso em: 10 jun. 2017

SPURR, S. H. **Forestry inventory**. New York: Ronald Press, 1952.

THAINES, F. et al. Equação para a estimativa de volume de madeira para região da bacia do Rio Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 30, n. 64, p. 286-289, 2010. <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.64.283>.

TONINI, H.; BORGES, R. A. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 35, n.82, p. 111-117, 2015. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.738>.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth**: applications to mixed tropical forests. Wallingford, UK: CAB International, 1994.

VERÍSSIMO, A. **Estratégia e mecanismos financeiros para florestas nativas do Brasil**. Roma: FAO, 2006. Disponível em: <http://www.fao.org/forestry/12074-027fef11c6831b6a2995ab35f025d075c.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2017.

VIBRANS, A. C. et al. Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil. **Annals of Forest Science**, Nancy, v. 72, n. 6, p. 865-874, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0481-x>.

CAPÍTULO 2

RENDIMENTO VOLUMÉTRICO DE ESPÉCIES COMERCIAIS DA AMAZÔNIA, BRASIL

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira abriga quase um terço das florestas tropicais úmidas da terra, com um volume estimado de 60 bilhões de metros cúbicos de madeira em toras (ARIMA et al., 2002; ARIMA; VERÍSSIMO, 2002; BARROS; VERÍSSIMO, 2002), cujo valor econômico potencial é equivalente ou mais rentável que as atividades agropecuárias e mineração (VERÍSSIMO et al., 2006; ALMEIDA et al., 2010a; ALMEIDA et al., 2010b; SANTANA et al., 2012; SILVA; ALMEIDA; POMPERMAYE, 2014). Além disso, tem sido uma das principais regiões produtoras de madeira tropical no mundo atrás apenas da Malásia e Indonésia (OIMT, 2012).

Em seus esforços para promover o uso correto dos produtos madeireiros oriundos de florestas nativas, o governo Brasileiro, por meio de seus órgãos fiscalizadores, vem desenvolvendo e aplicando um conjunto de resoluções e instruções normativas para definir os padrões legais de exploração e aproveitamento de madeira, visando o máximo rendimento e redução do desperdício.

Dentre o conjunto de leis que regulam a produção de madeira, têm-se a Resolução CONAMA 474/2016 que estabelece o aproveitamento de madeira serrada, o qual definido deve ser de pelo menos 35% do coeficiente de rendimento volumétrico, podendo ser obtido individualmente por espécie ou pelo conjunto de espécies mais processadas nas indústrias madeireiras. De acordo com Gerwing et al. (2001), a busca por aumentos no coeficiente de rendimento, no desdobro das toras em produtos como madeira serrada, influenciará positivamente na redução da área de floresta necessária para produção de um mesmo volume de madeira serrada. Assim, a indústria que não atender o padrão estabelecido pode ser multada pelo desperdício excessivo de matéria prima.

Embora haja aproximadamente mais de 80 espécies madeireiras sendo processadas nas serrarias na Amazônia, uma empresa frequentemente se especializará em menos de 30 espécies (VERÍSSIMO et al., 1998). De todas as espécies comerciais extraídas dos planos de manejo autorizados, uma boa

porcentagem compõe as espécies de *Dinizia excelsa* Ducke (Angelim vermelho), *Manilkara huberi* Ducke (Massaranduba) e *Dipteryx odorata* Aubl. Willd. (Cumarú), que são as de maior exportação e retorno econômico (VERÍSSIMO et al., 1999; GERWING et al., 2001; DANIELLI et al., 2016).

Desta forma, é importante levantar informações referentes ao rendimento em madeira serrada, bem como comparar o aproveitamento e geração de resíduos entre as espécies tropicais mais comercializadas na indústria de transformação na região Amazônica. Não menos importante, quantificar os subprodutos deste processo são ações necessárias para o melhor aproveitamento das espécies, bem como podem subsidiar futuras decisões sobre o desempenho industrial da empresa como a redução de gastos e diminuição de perdas no processo produtivo (BIASI; ROCHA, 2007; PIOVESAN et al., 2013, MELO et al., 2016).

Entre os produtores de madeira serrada na Amazônia brasileira, o Estado da Amapá é apenas o sexto maior (SFB; IMAZON, 2010), entretanto está atualmente em processo de concessão florestal, promovendo a Floresta Estadual - Flota/AP em florestas primárias de produção (IEF, 2017). Neste contexto, espera-se que a produção de madeira em tora e, conseqüentemente, de madeira serrada aumentem em larga escala. Assim, análises precisas e confiáveis do rendimento de madeira serrada de espécies comerciais são necessárias para nortear o aproveitamento máximo e definir regulamentos eficientes que sustentam a produção de madeira legal.

Até o momento, poucos estudos sobre o rendimento de madeira serrada de espécies comerciais no Amapá foram desenvolvidos ou publicados, e as informações e análises precisas são imprescindíveis para o funcionamento legal da indústria junto aos órgãos fiscalizadores. O presente estudo pretende preencher essa lacuna em: (i) desenvolver o coeficiente de rendimento para dez espécies comerciais no Amapá e (ii) testar a variação do rendimento de madeira serrada por espécie e por classe de diâmetro médio da tora.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do local de estudo

O trabalho foi desenvolvido em uma serraria de médio porte que processa até 20.000 m³ de madeira em tora por ano. Está localizada na zona rural do Município de Porto Grande, Amapá (00° 41' 53,91" N e 51° 26' 4,27" O), distante aproximadamente 130 km de Macapá-AP. O acesso se dá pela Rodovia Perimetral Norte km 02.

A serraria ocupa uma área de aproximadamente sete hectares, com espaço reservado para pátio de estocagem das toras, setor de mecânica para manutenção de máquinas pesadas, além de um galpão principal de produção e um para o estoque de produtos serrados. O setor administrativo compõe o restante da indústria com espaços reservados para alojamento e refeitório dos funcionários.

O galpão principal possui duas linhas de produção e cada uma é composta pelos seguintes equipamentos: 1 - Laminação completa de marca IKL; 1 - Guincho do carro porta toras (marca Schiffer); 1 - Guincho de puxar e virar toras 10 CV; 1 - Carro porta-toras (quatro cabeças) marca IKL; 1 - Serra-de-fita (IKL de 4 cabeças); 1 - Alinhadeira com avanço/guincho (marca Schiffer); 1 - Multilâmina marca águia motor de 30 CV; 1 - Multilâmina marca águia motor de 50 CV; 2 - Destopadeira (marca IKL/Potência 7,5 CV); 1- Plaina (DAMBROZ 4 eixos, potência dos motores 01 de 10 CV, 3 de 7,5 CV, 1 de 5 CV, 01 de 3 CV da elevação da bancada); 1 - Exaustor (Potência 7,5 cv); 1 - Grupo gerador marca STEMAC de 300 kva.

2.2 Seleção das espécies, amostragem e coleta de dados

2.2.1 Seleção das espécies

Este estudo contemplou a avaliação do rendimento de madeira serrada de dez espécies comerciais que, além de serem estabelecidas pelo mercado consumidor como as mais trabalhadas, são as que apresentaram processamento de mais de 50 toras durante o período analisado. Essas espécies também são provenientes das explorações autorizadas nos planos de operação anual e apresentam bom retorno econômico para a empresa, a saber: *Dinizia excelsa* Ducke (Angelim vermelho),

Dipteryx odorata (Cumarú), *Manilkara huberi* L. (Massaranduba), *Carapa guianensis* Aubl. (Andiroba), *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim pedra), *Goupia glabra* Aubl. (Cupiúba), *Handroanthus albus* Vahl. Nichols. (Ipê), *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), *Ocotea rubra* Mez (Louro vermelho) e *Vochysia guianensis* Aubl. (Quarubatinga).

2.2.2 Madeira em tora

Para cada espécie foram selecionadas aleatoriamente 50 toras com diâmetro médio maior que 50 cm. Em cada tora, foram mensurados os diâmetros da base e do topo com casca além do comprimento total e estimado o volume por meio de cubagem rigorosa. Foram realizadas também as medições do oco, medindo-se em cruz os diâmetros que as dimensões ocupavam na tora. As toras que não apresentavam distorções no comprimento foram realizadas apenas uma medição.

Foi realizado o cálculo de suficiência amostral para ter a estimativa do número ótimo de toras que seriam representativas para compor o estudo de rendimento. Para todos os casos foi adotado um limite erro admissível de 10% com probabilidade de 95% de confiança. Assim, considerou-se os dados para uma população infinita de acordo a equação 1:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 S^2}{E^2 + \frac{t_{\alpha}^2 S^2}{N}} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que: n = número ótimo de toras; t = valor tabelado do teste t de Student ($\alpha = 0,05$); S^2 = variância da amostra; E = limite de erro admissível (10%); N = número total de toras mensuradas (50).

A estimativa do volume das toras foi efetuada de acordo com o que preceitua a Resolução nº 411 CONAMA, de 06 de maio de 2009. O volume foi calculado individualmente pelo método geométrico utilizando a fórmula de Smalian (Equação 2):

$$V_i = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) \times L \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que: V_i = volume da tora i ; g_i = área transversal da base da tora i em m^2 ; g_{i+1} = área transversal do topo da tora i em m^2 ; L = comprimento da tora i em m.

2.2.3 Madeira serrada

A operação de desdobro da madeira é realizada conforme sequência ilustrada na Figura 1. No desdobro principal, as toras foram admitidas no processo passando pela serra-fita vertical com diâmetro de volantes de 1,25 m e altura de corte de 80 cm. Os primeiros cortes foram realizados se retirando as costaneiras e a primeira peça (geralmente uma tábua), formando-se um semibloco. Posteriormente, o semibloco foi desdobrado em cortes sucessivos originando produtos com diferentes dimensões. Para o ajuste e definição das larguras dos produtos originados da serragem do semibloco, foi utilizado uma serra circular refiladeira com altura de corte de 80 mm, onde foram definidos em produtos com dimensões variando de 30 a 110 mm e comprimentos variando de 2 m a 9 m. O último processo foi realizado na serra circular destopadeira, onde foram retirados os defeitos, como nós, rachaduras, ataques de brocas, etc. Depois de alinhadas e bitoladas, os produtos foram enviados para o galpão de armazenamento.

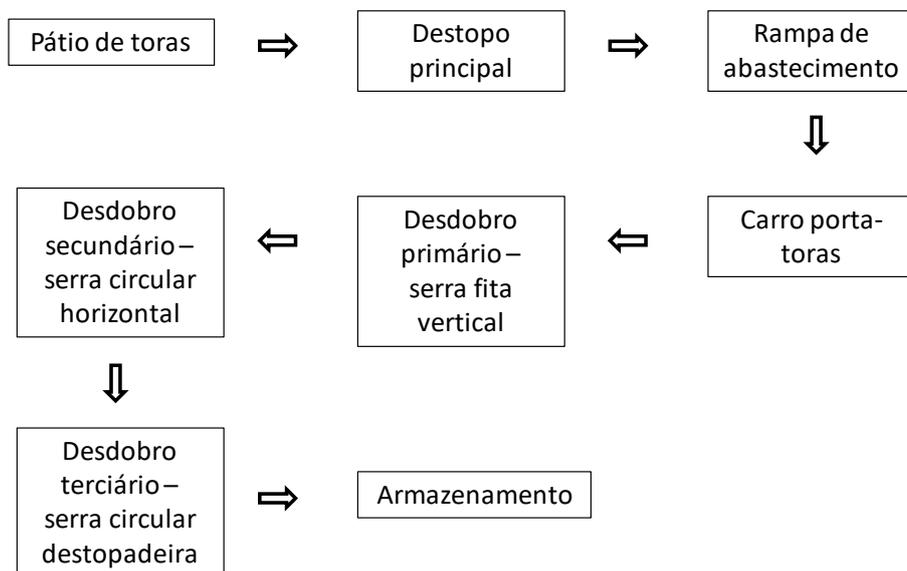


Figura 1. Fluxo de produção para o desdobro de madeira em tora de uma serraria localizada em Porto-Grande, Amapá.

2.3 Estimativa do volume de madeira serrada e rendimento volumétrico

Para o cálculo do volume em madeira serrada, todos os produtos obtidos no desdobro de cada tora foram quantificados e tiveram suas espessuras, larguras e comprimentos mensurados.

As medidas de espessura, em cada extremidade, foram obtidas com auxílio de um paquímetro. As medidas de largura, uma em cada extremidade do produto e o comprimento, foram mensuradas com auxílio de trena. Assim, foram obtidos 'E' (espessura) e 'L' (largura) e comprimento (C) de cada produto serrado das toras. O volume de cada produto foi determinado por meio da equação 3:

$$V_p = E \times L \times C \quad \text{Eq. (3)}$$

em que: V_p = Volume do produto serrado (m^3); E = Espessura média (m); L = Largura média (m); C = Comprimento (m).

Após a determinação dos volumes dos produtos, os mesmos foram somados, obtendo-se o volume em madeira serrada para cada tora processada.

A determinação do aproveitamento de madeira ou rendimento volumétrico das espécies foi realizada por meio da razão entre o volume em madeira serrada e o volume com casca das toras processadas, dado pela equação 4:

$$R\% = \frac{\sum_{i=1}^j V_p}{\sum_{i=1}^j V_t} \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que: $R\%$ = Rendimento em madeira serrada para cada tora (i) da espécie (j) (%); V_p = volumes de todos os produtos por tora (i) da espécie (j) (m^3); V_t = volumes de todas as toras (i) da espécie (j) (m^3).

O rendimento volumétrico para cada espécie foi obtido a partir da média aritmética dos valores de rendimento (%) obtidos de cada tora das mesmas. O rendimento médio geral obtido para a serraria foi obtido a partir da média aritmética dos valores dos rendimentos obtidos pelas dez espécies analisadas.

2.4 Análise estatística

Foram calculadas as principais medidas descritivas e aplicado o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,01$) sobre os dados para todas as espécies analisadas com o intuito de verificar a normalidade. Foram adotados dois delineamentos experimentais,

ambos inteiramente casualizados. O primeiro considerando o rendimento médio entre as espécies e o segundo considerando a comparação do rendimento médio de cada espécie em diferentes classes de diâmetro. As repetições foram as 50 toras mensuradas.

No segundo delineamento, os tratamentos (centro de classes de diâmetro) tiveram um número de repetições diferentes. Quando se considerou como tratamento as espécies, as repetições foram iguais. Em ambos os casos, foram realizadas as análises de variância para verificar se os tratamentos (espécies e centro de classes de diâmetro) causaram um efeito significativo no rendimento (%) a 95% de probabilidade. Quando identificado efeito significativo dos tratamentos, foi empregado o teste Tukey para discriminar as diferenças entre as suas médias a 95% de probabilidade. Todas as análises foram realizadas com o auxílio do Software R® (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017), utilizando os pacotes *stats* e *agricolae*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O rendimento médio geral encontrado para as dez espécies foi de 43,95% (Tabela 1). De acordo com o cálculo do número ótimo de amostras, a quantidade de toras que seriam necessárias variou de 26 para *Vochysia guianensis* a 45 para *Goupia glabra*. De modo geral, esses resultados estão de acordo com os valores de erro padrão encontrados, sugerindo que a amostragem de 50 toras para cada espécie é representativa para o desenvolvimento do trabalho.

Tabela 1. Quantificação de produtos e rendimento volumétrico obtidos no desdobro de 50 toras das 10 espécies comerciais analisadas em uma serraria de médio porte em Porto Grande, Amapá.

Espécies	Média		Quantidade		Volume total (m ³)		Rend. (%)	Erro padrão (%)
	DM (cm)	Comp. (m)	Toras	Produtos serrados	Toras	Serrado		
<i>Carapa guianensis</i>	55,17	9,83	N = 50; n = 33	2643	119,37	44,22	37,8	4,35
<i>H. petraeum</i>	62,14	5,93	N = 50; n = 39	5000	81,54	44,72	54,41	2,44
<i>Dinizia excelsa</i>	103,05	5,11	N = 50; n = 37	4551	182,79	100,31	54,40	2,81
<i>Dipteryx odorata</i>	62,23	5,52	N = 50; n = 37	3903	84,04	33,28	39,07	3,05
<i>Goupia glabra</i>	54,17	8,05	N = 50; n = 45	1994	86,57	34,27	39,72	0,92
<i>Handroanthus albus</i>	54,14	7,09	N = 50; n = 38	3143	81,87	31,7	39,7	2,73
<i>Hymenaea courbaril</i>	67,35	8,05	N = 50; n = 39	5943	145,72	58,06	39,85	2,35
<i>Ocotea rubra</i>	59,69	9,85	N = 50; n = 41	2655	137,39	61,57	44,72	1,76
<i>Manilkara huberi</i>	58,69	8,87	N = 50; n = 40	4948	121,95	48,79	40,3	2,16
<i>Vochysia guianensis</i>	64,84	8,02	N = 50; n = 26	6020	131,59	63,01	49,57	8,0

Média geral	64,15	7,6	4080	117,3	51,99	43,95	3,05
-------------	-------	-----	------	-------	-------	-------	------

DM (cm) = diâmetro médio das toras; Comp.(m) = comprimento médio das toras; N = número de toras mensuradas; n = número de toras que seriam suficientes para cada espécie ($\alpha = 0,05$; GL = 49); Rend. = rendimento.

Os maiores valores de rendimento de madeira, considerando a tora sem oco, foram obtidas pelas espécies *Hymenolobium petraeum* e *Dinizia excelsa*, respectivamente com 54,41% e 54,40%. No entanto, esses resultados similares diferem quanto às dimensões de diâmetro e ao volume da tora encontrados, pois embora as toras de *Hymenolobium petraeum* apresentem menores dimensões (DM = 62,14 cm; Vol tora = 81,54), a capacidade de aproveitamento em madeira serrada (produtos serrados = 5000) é superior a de *Dinizia excelsa* com as maiores dimensões encontradas na serraria (DM = 103,05 cm; Vol tora = 182,79 m³). As espécies que apresentaram maiores quantidades de produtos serrados foram *Vochysia guianensis* e *Hymenaea courbaril*.

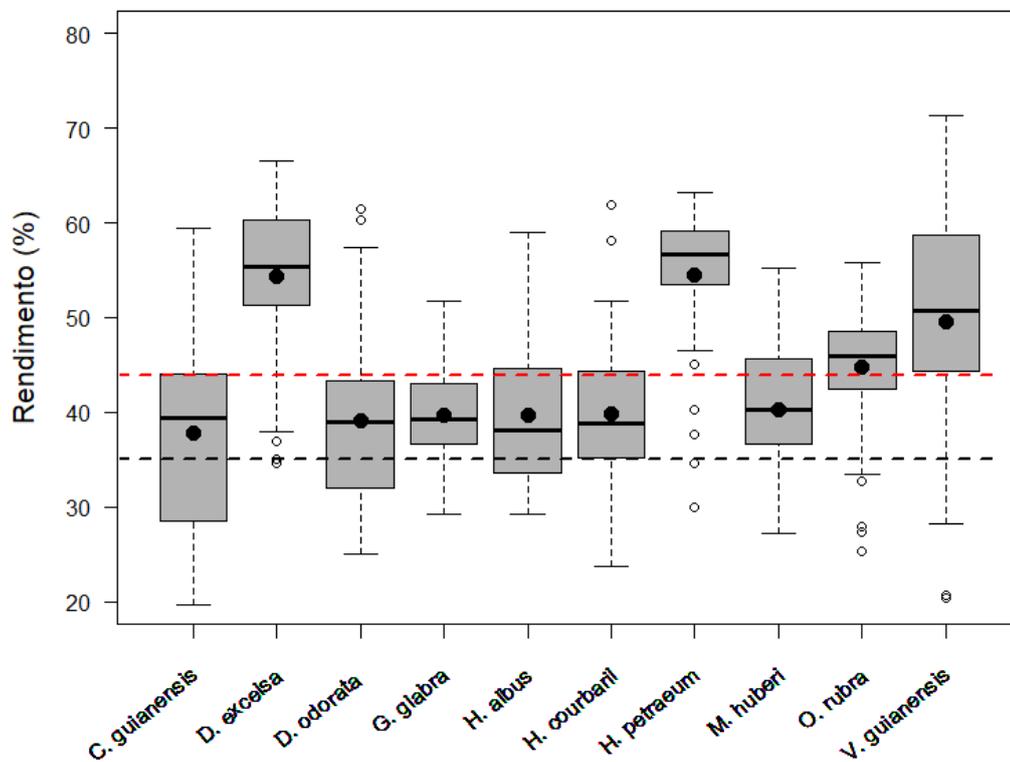
O rendimento volumétrico de *Vochysia guianensis* foi o terceiro maior encontrado (49,57%) estando acima da média geral da serraria, indicando bom aproveitamento embora o diâmetro médio da tora seja superior ao de *Hymenolobium petraeum*. Muito embora a espécie *Hymenaea courbaril* tenha apresentado a segunda maior quantidade de produtos serrados, seu rendimento volumétrico (39,85%) ficou abaixo da média geral. Os resultados obtidos para o rendimento de *Hymenaea courbaril* são diferentes quando comparados com o de *Ocotea rubra*, pois esta espécie possui diâmetro médio menor e produtos serrados em menor quantidade, porém com maior aproveitamento de madeira (44,72%) ficando ligeiramente acima da média encontrada para a serraria.

Os menores rendimentos volumétricos foram apresentados pelas espécies *Carapa guianensis* (37,8%), *Dipteryx odorata* (39,07%), *Handroanthus albus* (39,70%) e *Goupia glabra* (39,72%), indicando que mais de 60% da madeira serrada dessas espécies não compõem os produtos principais da serraria.

Os valores de rendimento obtidos estão dentro do que é estabelecido pelas exigências legais, (superior a 35%). Assim, a serraria estudada está dentro do padrão com o que preceitua a lei sobre os procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos e subprodutos florestais madeireiros de origem nativa.

Na distribuição dos rendimentos para cada espécie (Figura 2), têm-se que para *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Ocotea rubra* e *Vochysia guianensis* pelo menos 75% das toras apresentam rendimento volumétrico acima da média encontrada para a serraria. Todavia, as espécies *Carapa guianensis*, *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Handroanthus albus*, *Hymenaea courbaril* e *Manilkara huberi* sugerem que entre 50% a 75% das toras apresentem rendimento inferior ao da serraria (43,95%), ou seja, tendem a ter um baixo aproveitamento de madeira serrada para produtos principais como (pisos, esquadrias, madeira aparelhada, etc.) e que mais de 55% tendem a ser destinadas a produtos secundários como ripas, caibros, tábuas e similares.

Figura 2. Boxplot para o rendimento de madeira serrada das 10 espécies comerciais de uma serraria localizada em Porto Grande, Amapá. Nota: a linha horizontal em preto dentro de cada caixa indica a mediana; os pontos pretos são as médias; a linha tracejada em vermelho indica o rendimento volumétrico geral (43,95%) obtido para a serraria considerando as 10 espécies conjuntamente; a linha tracejada em preto indica o rendimento aceitável (35%) pelas exigências legais.



Os valores de média e mediana encontrados sugerem que os dados de rendimento tendem para uma distribuição normal. Este fato corrobora com o resultado do teste de Shapiro Wilk ($\alpha = 0,01$) para as espécies *Handroanthus albus*: (p-value = 0,02996); *Goupia glabra* (p-value = 0,793); *Hymenaea courbaril* (p-value 0,4147); *Manilkara huberi* (p-value = 0,2198) e *Vochysia guianensis* (p-value = 0,01985). As espécies *Carapa guianensis*, *Hymenolobium petraeum* e *Dinizia excelsa* apresentam um ligeiro desvio da normalidade indicando uma distribuição assimétrica negativa onde os valores da média do rendimento dessas espécies são menores que o da mediana.

Na comparação dos dados de rendimento entre espécies, têm-se que o valor do teste F apresentou diferença estatística (p-value < 0,001; F = 27,67; GL = 490), ou seja, existe uma relação probabilística de diferença de rendimento entre as espécies, o que já era esperado. O resultado do teste Tukey (Figura 3 e Tabela 2), aponta diferença dos contrastes de médias de rendimento de *Carapa guianensis*, *Dipteryx odorata* com pelo menos quatro espécies. Para este experimento o coeficiente de variação encontrado foi de 19,83% o que indica uma boa precisão experimental.

Figura 3. Contrastes de médias de rendimento entre as dez espécies analisadas. Nota: As espécies em vermelho indicam que o contraste entre as médias de rendimento difere de zero de acordo com o teste Tukey a 95% de probabilidade.

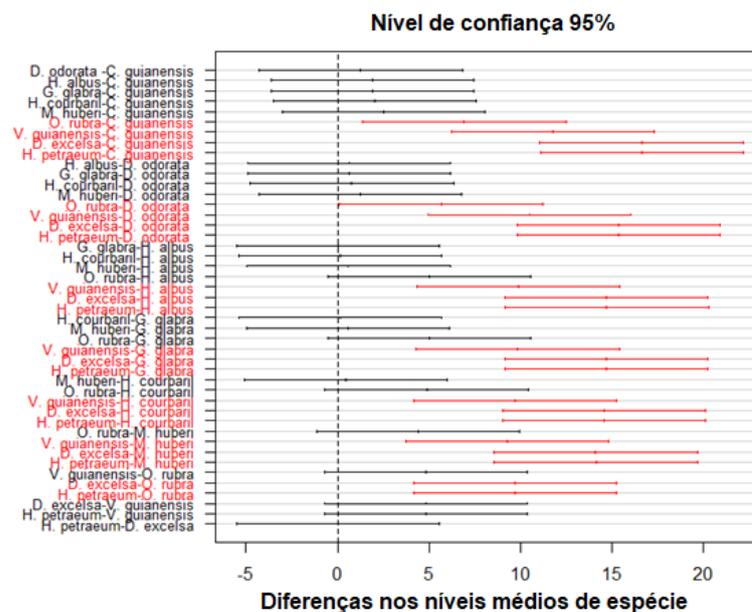


Tabela 2. Comparação dos contrastes de médias de rendimento entre as dez espécies analisadas.

Espécies	Médias de rendimento (%)
<i>Hymenolobium petraeum</i>	54,41a
<i>Dinizia excelsa</i>	54,40a
<i>Vochysia guianensis</i>	49,57ab
<i>Ocotea rubra</i>	44,72bc
<i>Manilkara huberi</i>	40,30cd
<i>Hymenaea courbaril</i>	39,85cd
<i>Goupia glabra</i>	39,72cd
<i>Handroanthus albus</i>	39,70cd
<i>Dipteryx odorata</i>	39,07d
<i>Carapa guianensis</i>	37,80d

Teoricamente, boa parte da significância estatística obtida na comparação dos contrastes de médias das espécies se deve ao *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa* e *Vochysia guianensis*. Essas espécies apresentaram diferenças das demais e foram similares quando comparadas entre si. Nota-se ainda que essas espécies de maior rendimento apresentam diferenças de médias com as espécies *Handroanthus albus*, *Goupia glabra*, *Hymenaea courbaril* e *Manilkara huberi*. A *Ocotea rubra* indicou que o contraste de médias não difere de zero quando comparado com *Vochysia guianensis*, porém é diferente de *Hymenolobium petraeum* e *Dinizia excelsa*. A média de rendimento de *Carapa guianensis* é estatisticamente diferente de *Ocotea rubra*, *Vochysia guianensis*, *Dinizia excelsa* e *Hymenolobium petraeum*. As espécies *Dipteryx odorata*, *Handroanthus albus*, *Goupia glabra*, bem como *Hymenaea courbaril* e *Manilkara huberi* indicam haver semelhanças entre as médias de rendimento ponto de vista estatístico.

Esse resultado já era esperado uma vez que *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa* e *Vochysia guianensis* concentram os maiores valores de rendimento. Apesar das igualdades de médias entre essas espécies, pode-se observar ainda a tendência de diminuição ou estabilidade de rendimento em função das classes diamétricas analisadas. Essas evidências demonstraram que o aumento do diâmetro das toras não proporcionou o aumento significativo de rendimento, sugerindo que o volume da tora nessas espécies não apresente relação linear significativa, muito embora a média do rendimento seja superior à da serraria.

As médias similares entre *Carapa guianensis*, *Handroanthus albus*, *Goupia glabra*, *Hymenaea courbaril* e *Manilkara huberi* sugerem que as diferentes dimensões volume das toras, de quantidade e produtos serrados não interfira significativamente nas médias de rendimento. Dessa forma, pode-se recomendar para essas espécies que o estabelecimento de metodologias diferentes de corte pode ser testado para que se consiga atingir níveis de rendimentos elevados, ou pelo menos aproximar do rendimento médio da serraria.

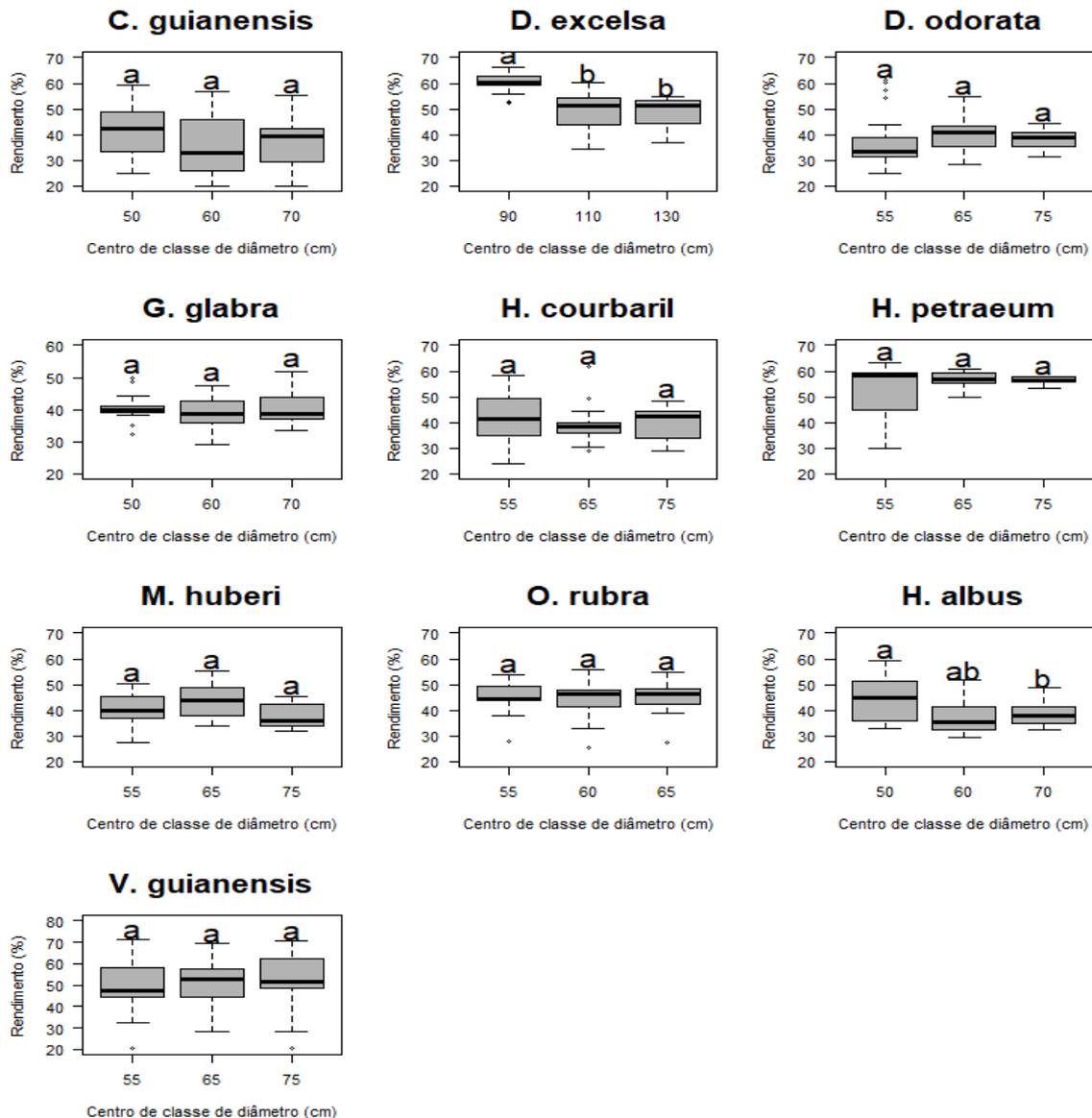
No entanto, entre os valores de rendimento nos centros de classes de diâmetro pôde-se observar que não houve diferença estatística, exceto para as espécies *Dinizia excelsa* e *Handroanthus albus* (Figura 4). Para essas duas espécies as variações no diâmetro da tora influenciam no rendimento de madeira serrada, no entanto têm-se que toras de maior diâmetro tendem a apresentar menores valores de rendimento.

As classes de maior diâmetro médio onde o rendimento é menor, ocorrem em função das toras mais grossas apresentarem incidência de falhas internas como oco, rachaduras, ataque de insetos, etc., o que acarreta diretamente em redução no rendimento de madeira serrada. Outro fator que deve ser levado em consideração também é a conicidade das toras que influencia na variedade de produtos obtidos, o que pode fazer com que algumas classes diamétricas não sejam adequadas para obtenção de produtos com dimensões homogêneas.

Ao contrário *Dinizia excelsa* e *Handroanthus albus*, o rendimento por classe de diâmetro para as demais espécies sugere similaridade estatística, muito embora na medida em que aumenta o diâmetro da tora, os valores de rendimento tendem a manter igualdade, evidenciando baixa variação. Todavia, mesmo não havendo diferença estatística entre as classes diamétricas, as pequenas diferenças percentuais de rendimento entre as classes são muito importantes dentro de uma escalade produção, não só na redução dos custos operacionais, mas também na redução dos resíduos gerados pela serraria, os quais, como é prática habitual na região em estudo, são pouco aproveitados. Assim as tendências de variações observadas entre as classes podem gerar grandes diferenças numa situação de produção de madeira serrada em larga escala.

Pode-se observar ainda na Figura 4 que apenas a primeira classe de diâmetro de de *Hymenolobium petraeum* e *Dinizia excelsa* apresentaram rendimento superior

Figura 4. Boxplot para os dados de rendimento por classe de diâmetro para as 10 espécies comerciais analisadas em uma serraria localizada em Porto Grande, Amapá. Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.



as outras espécies em todas as classes diamétricas. Para *Carapa guianensis*, *Goupia glabra*, *Handroanthus albus* e *Hymenaea courbaril* as toras com diâmetro médio de 50 e 60 cm tendem a apresentar rendimento médio inferior a 40%. De modo geral, pode-se dizer que, em termos de rendimento, o *Hymenolobium petraeum* foi o que apresentou melhores resultados, e a *Carapa guianensis*, os piores mesmo não havendo nenhuma diferença estatística entre as classes de diâmetro.

Os coeficientes de variação para o delineamento de cada espécie sugerem uma boa precisão experimental, sendo: *Carapa guianensis* = 27,42%; *Hymenolobium petraeum* = 13,89%; *Dinizia excelsa* = 11,20%; *Dipteryx odorata* = 22,53%; *Goupia glabra* = 12,06%; *Handroanthus albus* = 19,72%; *Hymenaea courbaril* = 19,34%; *Ocotea rubra* = 14,99%; *Manilkara huberi* = 17,81%; *Vochysia guianensis* = 28,93%.

Estudos sobre produção de madeira serrada e análise do rendimento volumétrico de espécies comerciais têm sido realizados com ênfase na Amazônia brasileira (IWAKIRI, 1990; GERWING et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2003; ÂNGELO et al., 2004; PINHEIRO et al., 2004; BIASI; ROCHA, 2007; RIBEIRO; ROCHA, 2009; SILVA et al., 2012; BRAZ et al., 2014; ARAÚJO et al., 2014; SILVA et al., 2015; MELO et al., 2016).

Dentre os estados da Amazônia Legal, o Estado do Amapá compreende pouco mais de 2% do total de indústrias que processam madeira de espécies nativas, estando a frente apenas do Acre (1,07%) e Roraima (1,66%). Apesar do crescimento gradativo nos últimos anos, o rendimento em madeira serrada no Amapá não ultrapassa 45%, o qual é similar ao encontrado no presente estudo. Por exemplo, considerando a produção de 2009, o consumo de madeira em tora foi superior a 940.000 metros cúbicos com geração de 410.000 metros cúbicos de madeira serrada (SFB; IMAZON, 2010; PEREIRA; VERÍSSIMO, 2010).

Vários fatores afetam o rendimento volumétrico nas serrarias que processam espécies comerciais amazônicas, podendo-se citar como principais o armazenamento da tora no pátio de estocagem, tipo de equipamentos utilizados no desdobro e tipo de produtos gerados. Quanto ao tipo de armazenamento, a perda em volume da tora pode ocorrer principalmente por danos causados por insetos (GERWING et al., 2001).

O baixo rendimento pode ser ocasionado também por rachaduras ocorridas durante a exploração e são responsáveis pelo grande volume de madeira perdido durante o armazenamento das toras no pátio das empresas, tendo como espécies mais susceptíveis a *Manilkara huberi* (Massaranduba) (WILLISTON, 1981; GERWING et al., 2001; DANIELLI et al., 2016, MELO et al., 2016). Quanto aos equipamentos utilizados, uma grande fonte de desperdício nas serrarias pode ser a produção de madeira com espessura excessiva, a qual compensa a variação da espessura na serragem e reduz a incidência de madeira processada abaixo do tamanho normal (STEELE, 1984; HEBERT et al., 2000; GERWING et al., 2001). Neste caso, os

produtos primários contribuem significativamente para a redução do rendimento, sendo compensado posteriormente com a volumetria de produtos secundários ou maior aproveitamento de peças pequenas oriundas da resserragem (GERWING et al., 2001).

O rendimento geral encontrado neste estudo abaixo de 50%, pode estar relacionado aos fatores específicos das espécies como grã das fibras, ao diâmetro da tora, conicidade e tortuosidade, as técnicas de desdobro e equipamentos utilizados (MURARA JÚNIOR et al., 2013). A conicidade e tortuosidade também influenciam significativamente no aproveitamento de madeira, pois diferenças significativas entre os diâmetros da ponta grossa e da ponta fina geram perda excessiva de material, visto que a obtenção de madeira serrada se dará a partir da ponta de menor diâmetro. Já a tortuosidade pode gerar uma maior quantidade de resíduos, diminuindo o rendimento (HEBERT et al., 2000; AFRIFAH; FRIMPONG-MENSAH, 2014).

Neste estudo, o tipo de desdobro das toras seguiu o padrão da maioria das serrarias da região Amazônica, sendo o tangencial. Este tipo de desdobro consiste no corte tangencial aos anéis de crescimento da árvore que, além de fornecer produtos primários com melhor desempenho, aumenta o rendimento e apresenta menor limitação de largura dos produtos e maior rapidez de secagem (ROCHA; TOMASELLI 2001; ROCHA, 2002; MANHIÇA et al., 2012).

Esses resultados são fundamentados por Murara Júnior et al. (2005), Dobner Júnior et al. (2012), Murara Júnior et al. (2013), de que o operador da serra principal tem maior responsabilidade no rendimento da serraria. Por outro lado, as dimensões dos produtos que são gerados na serra principal são definidas pelo operador no equipamento de refiladeira e alinhadeira, onde são usadas serras com espessuras mais largas gerando mais resíduos. No entanto, a sua tomada de decisão sobre a largura da peça a retirar influencia diretamente sobre o rendimento obtido a partir do desdobro de toras (MANHIÇA et al., 2012).

Embora o rendimento geral para a serraria tenha sido inferior a 50%, os resultados mostrados neste trabalho são superiores aos resultados obtidos por outros autores: Dutra et al. (2005), 32,30%; Clement e Higuchi (2006), 30%, Nascimento et al. (2006), 36,50%; Cavallet et al. (2010), 35,18%, Pereira et al. (2010), 37%, Marchesan (2012), 29,88%, que também avaliaram o rendimento de diferentes espécies comerciais na Amazônia. Entretanto, ficou abaixo da faixa de 45 a 55%

sugerida para folhosas (GOMIDE, 1974, DANIELLI et al., 2016), e abaixo dos valores observados por Oliveira et al. (2003), 49,28%; Souza (2006), 45,16% e Biasi e Rocha (2007), 58,8%, que também estudaram o rendimento de espécies tropicais.

De modo geral, o rendimento do fuste de uma espécie comercial amazônica pode variar de 40% a 65% (MADY, 2000), ou seja, aproximadamente metade da tora é transformada em resíduos e isso ocorre muitas vezes em função do tipo da madeira e, também, tecnologias aplicadas (VIDAL et al., 1997; VERISSÍMO et al., 2002). Considerando as dez espécies estudadas, o rendimento médio variou de 37% a 54,4%, estando dentro do padrão encontrado para o trabalho de Fontes (1989), que avaliando um conjunto de espécies encontrou o rendimento variando de 25% a 70%.

As análises por classes diamétricas facilitam a avaliação e influência do diâmetro da tora nos valores mínimos e máximos de rendimento, bem como o processo produtivo e operacional na serraria (DANIELLI et al., 2016; MELO et al., 2016). As toras de mesma classe diamétrica apresentam valores de rendimento com baixa variação e esta tendência permanece quando ocorre aumento da classe. Algumas espécies como *Dinizia excelsa* e *Handroanthus albus* sugerem considerar a estratificação por classe de diâmetro médio uma vez que o aproveitamento de madeira serrada diminuiu. Entretanto, as oito espécies restantes sugerem que o rendimento é similar em diferentes classes de diâmetro da tora, com ligeira diminuição do rendimento para classes maiores. Tonini e Ferreira (2004), analisando o rendimento de espécies tropicais, também constataram diminuição no rendimento em classes diamétricas maiores, em função da ocorrência de rachaduras, nós, protuberâncias e podridões de cerne (oco) nas toras estudadas. Outras pesquisas mostram ainda que o rendimento por classe de diâmetro também é similar para espécies comerciais como por exemplo: *Manilkara huberi* (DANIELLI et al., 2016), *Erismia uncinatum*, *Qualea albiflora* e *Mezilaurus itauba* (BIASI; ROCHA, 2007).

Quando se considera as médias de rendimento entre as espécies, resultados similares foram encontrados para *Dipteryx odorata*, *Goupia glabra*, *Manilkara huberi* e *Carapa guianensis*. Além da forma e perfil do tronco que são mais retilíneos para essas espécies (SANTOS, 2002; FERRAZ et al., 2002; COSTA et al., 2007; CARVALHO, 2009), a similaridade de rendimento pode estar relacionada também as dimensões das toras encontradas, muito embora a quantidade de produtos serrados seja diferente. Entretanto, quando se consideram as espécies de maiores dimensões,

como por exemplo *Dinizia excelsa* e *Vochysia guianensis*, as diferenças de rendimento são notórias.

Para a *Manilkara huberi* que é a espécie de maior comercialização da serraria, o rendimento médio obtido nesse estudo foi de apenas 40,30%, porém é superior a 30,1% encontrando por Danielli et al. (2016). O valor de rendimento desta espécie pode estar relacionado às toras de grã reta, pois faz com que a liberação das tensões de crescimento e a secagem das extremidades estendem as rachaduras, o que acaba contabilizando em perda considerável do volume nas toras (GERWING et al., 2001).

De acordo com os dados da Organização Internacional das Madeiras Tropicais (ITTO, 2017), a produção de madeira serrada na região amazônica cresceu nos últimos anos. Estimou-se, por exemplo, que o volume de exportações de madeira serrada tropical aumentou 4,7% em volume, passando de 32.200 m³ em junho de 2016 para 33.700 m³ em junho de 2017. Entretanto, conforme o relatório apresentado por SFB e Imazon (2010), ainda possui um rendimento médio baixo (41%). Consequentemente estes dados sugerem que ocorra um enorme desperdício de madeira, muitas vezes em função da infraestrutura das serrarias e falta de conhecimento das potencialidades para diversas utilizações que os resíduos podem oferecer (BRAZ et al., 2014).

Na serraria em estudo, a destinação dos resíduos está voltada para produção de carvão e abastecimento de pequenas movelarias. Conforme mostrado por SFB e Imazon (2010), nas serrarias da região Amazônia, 24% dos resíduos são aproveitados de formas diversas (usado em aterros, como adubo, lenha, entre outros). Os resíduos que não são aproveitados são queimados ou abandonados como entulho.

Pereira et al. (2010) também estimaram a produção madeireira da Amazônia Legal no ano de 2009 com rendimento médio de 41% no processamento. Para Melo et al. (2016) o aproveitamento quantitativo da transformação de uma tora em tábuas, considerando-se uma tora com casca, se dá na ordem de 40% de madeira processada, sendo os 60% restantes assim alocados: 10% de aparas de plaina, 26% de aparas do corte, 13% de pó de serra e 11% de cascas.

Na região Amazônica, o desperdício no setor madeireiro ainda é muito grande, apesar dos avanços tecnológicos. A cada dez árvores cortadas, apenas cinco serão aproveitadas comercialmente (MADY, 2000). Okai et al. (2004) e Okai e Boateng (2007) também relataram que, para cada árvore derrubada, quase 50% do volume da

árvore é deixado na floresta sob a forma de ramos, coroa e toco. Com essa perda de recursos de madeira tanto na exploração quanto no processamento, pode-se dizer que a maioria das indústrias não está contribuindo com todo o seu potencial, e que serviços de compensação ambiental devem ser desenvolvidos e aplicados para as florestas nativas.

Assim, novas alternativas devem ser criadas para o gerenciamento da produção de madeira serrada e aproveitamento dos resíduos florestais oriundos da exploração florestal em diversos setores, potencializando a sua utilização e minimizando o desperdício durante a cadeia de produção, desde a colheita até a obtenção do produto final (BRAZ et al., 2014).

4. CONCLUSÕES

O rendimento geral obtido para a serraria, bem como o rendimento de cada espécie está dentro dos padrões legais para o funcionamento da indústria, em todos os casos sendo superior a 35%.

Não foram verificadas diferenças significativas das classes de diâmetro para as espécies, exceto para *Handroanthus albus* e *Dinizia excelsa*. Entretanto não foi evidenciado incremento linear significativo entre o diâmetro e rendimento de madeira serrada para todas as espécies.

As espécies *Dinizia excelsa*, *Hymenolobium petraeum*, *Ocotea rubra* e *Vochysia guianensis* apresentam diferença significativa de rendimento para as demais espécies devido aos maiores valores obtidos, entretanto são similares estatisticamente quando comparadas entre si.

REFERÊNCIAS

AFRIFAH, K. A.; FRIMPONG-MENSAH, K. Assessment of the effect of log diameter and inherent characteristics of four timber species on the yield of sliced veneer. **Global Advanced Research Journal of Physical and Applied Sciences**, Lagos, v. 3, n. 2, p. 17-24, 2014. Disponível em: <http://garj.org/garjpas/8/2014/3/3>. Acesso em: 5 jul. 2017.

ALMEIDA, A. N. et al. Análise dos fatores que influenciam o preço da madeira em tora para o processamento mecânico no Paraná. **Cerne**, Lavras, MG, v. 16, n. 2, p. 243-250, 2010b. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000200017>.

ALMEIDA, A. N. et al. Mercado de madeiras tropicais: substituição na demanda de exportação. **Acta Amazônica**, Manaus, AM, v. 40, n. 1, p. 119-126, 2010a. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000100015>.

ÂNGELO, H.; SILVA, G. F.; SILVA, V. S. M. Análise econômica da indústria de madeiras tropicais: o caso do pólo de Sinop, MT. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 14, n. 2, p. 91-101, 2004. <https://doi.org/10.5902/198050981809>.

ARAÚJO, J. A. et al. Rendimento e eficiência operacional do desdobro da madeira de faveira (*Parkia multijuga* Benth. - Fabaceae). **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, GO, v. 10, n. 19, p. 1656-1667, 2014. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2014b/AGRARIAS/Rendimento%20e%20eficiencia.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2017.

ARIMA, E. et al. **As florestas nacionais na Amazônia**: uma consulta a empresários madeireiros e a atores afins à política florestal. Brasília, DF: MMA, 2002. (Relatório Técnico). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276127395>. Acesso em: 12 set. 2017.

ARIMA, E.; VERÍSSIMO, A. **Preços de madeira em pólos madeireiros próximos de cinco florestas nacionais na Amazônia**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2002.

BARROS, A. C.; VERÍSSIMO, A. **A Expansão madeireira na Amazônia**: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará. 2. ed. Belém: Imazon, 2002. Disponível em: <http://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livros/a-expansao-madeireira-na-amazonia-impactos-e.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2017.

BATISTA, D. C.; CARVALHO, A. M. Avaliação do desempenho operacional de uma serraria através de estudo do tempo, rendimento e eficiência. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, n. 75, p. 31-38, 2007. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr75/cap03.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 37, n. 1, p. 95-108, 2007. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v37i1.7845>.

BRAZ, R. L. et al. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia – uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, TO, v. 5, n. 2, p. 168-181, 2014. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/1216>. Acesso em: 17 abr. 2017.

CAVALLET, J. et al. Rendimento em madeira de *Hymenaea Courbaril* (*Hymenaea courbaril*). In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2., 2010, Alta Floresta. **Anais...** Alta Floresta: UNEMAT, 2010. p. 20-23.

CARVALHO, P. E. R. Cumaru-Ferro *Dipteryx odorata*. Curitiba: Embrapa Florestas, 2009. 8 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 225). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2010/46374/1/CT225.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2017.

CLEMENT, C. R.; HIGUCHI, N. A floresta amazônica e o futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**, São Paulo, SP, v. 58, n. 3, p. 44-49, 2006. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252006000300018. Acesso em: 11 abr. 2017.

COSTA, D. H. M.; CARVALHO, J. O. P.; BERG, E. V. D. Crescimento diamétrico de maçaranduba (*Manilkara huberichevalier*) após a colheita da madeira. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Belém, PA, v. 3, n. 5, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes/-/publicacao/410197/crescimento-diametrico-de-macaranduba-manilkara-huberi-chevalier-apos-a-colheita-da-madeira>. Acesso em: 17 abr. 2017.

DANIELLI, F. E. et al. Modelagem do rendimento no desdobro de toras de *Manilkara* spp. (Sapotaceae) em serraria do estado de Roraima, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 44, n. 111, p. 641-651, 2016. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.10>.

DOBNER JÚNIOR, M.; HIGA, A. R.; ROCHA, M. P. Rendimento em serraria de toras de *Pinus taeda*: sortimentos de grandes dimensões. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 19, n. 3, p. 385-392, 2012. <https://doi.org/10.4322/floram.2012.053>.

DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequência sobre o meio ambiente e opções de uso. **HOLOS Environment**, Rio Claro, SP, v. 6, n. 1, p. 8-21, 2005. <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v6i1.177>.

FERRAZ, I. D. K.; CAMARGO, J. L. C.; SAMPAIO, P. T. B. Sementes e plântulas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl. e *Carapa procera* D.C.): aspectos botânicos, ecológicos e tecnológicos. **Acta Amazônica**, Manaus, AM, v. 32, n. 4, p. 647-661, 2002. <https://doi.org/1809-43922002324661>.

FONTES, P. J. P. **Aproveitamento energético da madeira derivada dos desmatamentos em Rondônia**. Brasília, DF: IBAMA/DIRPED, 1989 (IBAMA. DIRPED. LPF. Série Técnica, 9).

GARCIA, F. M. et al. Rendimento no desdobro de toras de Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Tauari (*Couratari guianensis*) segundo a classificação da qualidade da tora. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 19, n. 4, p. 468-474, 2012. <https://doi.org/10.4322/floram.2012.059>.

GERWING, J. et al. **Rendimento no processamento de madeira no estado do Pará**. Belém, PA: Imazon, 2001. (Série Amazônia, 18). Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_o_para_10550.pdf. 10 mai. 2017.

GOMIDE, J. L. **Serraria**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1974. Imprensa universitária.

HEBERT, F.; GRONDIN, F.; PLAICE, J. Mathematical modeling of curve sawing techniques for lumber industry. **Applied Mathematical Modelling**, Guildford, v. 24, n. 8-9, p. 677-687, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(00\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(00)00009-3).

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DO AMAPÁ - IEF. **Plano anual de outorga florestal do estado do Amapá – PAOF 2017**. Macapá, AP: IEF, 2017. Disponível em: <https://ief.portal.ap.gov.br/dados.php?d=756&a=460>. Acesso em: 3 jan. 2017.

IWAKIRI, S. Rendimento e condições de desdobro de 20 espécies de madeiras da Amazônia. **Acta Amazônica**, Manaus, AM, v. 20, p. 271-281, 1990. <https://doi.org/10.1590/1809-43921990201281>.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002. v. 2.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira**: informações sobre 90 espécies comerciais. Manaus, AM: SEBRAE/AM, 2000.

MANHIÇA, A. A.; ROCHA, M. P.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R. Rendimento no desdobro de *Pinus* sp. utilizando modelos de corte numa serraria de pequeno porte. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 409-420, 2012. <https://doi.org/10.5380/ufpr.v42i2.19641>.

MARCHESAN, R. **Rendimento e qualidade de madeira serrada de três espécies tropicais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_ms/2012/d592_0826-M.pdf. Acesso em: 10 mai. 2017.

MELO, R. R. et al. Análise da influência do diâmetro no rendimento em madeira serrada de cambará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 36, n. 88, p. 393-398, 2016. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1151>.

MENDIBURU, F. **Agricolae**: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.2-8. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>. Acesso em: 10 maio 2017.

MURARA JÚNIOR, M. I.; ROCHA, M. P.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R. Rendimento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 3, 2005. <https://doi.org/10.5380/ufpr.v35i3.5186>.

MURARA JÚNIOR, M. I.; ROCHA, M. P.; TRUGILHO, P. F. Estimativa do rendimento em madeira serrada de pinus para duas metodologias de desdobro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 20, n. 4, p. 556-563, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/floram.2013.037>.

NASCIMENTO, S. M.; DUTRA, R. I. J. P.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Holos Environment**, Rio Claro, SP, v. 6, n. 1, p. 8-21, 2006. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/177/161>. Acesso em: 5 mai. 2017.

OIMT. **Reseña anual y evaluación de lasituación mundial de lasmaderas**. Yokohama, Japón, 2012. 209 p.

OKAI, R.; FRIMPONG-MENSAH, K.; YEBOAH, D. Characterization of strength properties of branchwood and stemwood of some tropical hardwood species. **Wood Science Technology**, Berlin, v. 38, n. 2, p. 163-171, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00226-004-0232-x>.

OKAI, R.; BOATENG, O. Analysis of sawn lumber production from logging residues of branchwood of *Aningeria robusta* and *Terminalia ivorensis*. **European Journal of Forest Research**, Berlin, v. 126, p. 385-390, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0157-z>

OLIVEIRA, A. D. et al. Viabilidade econômica de serrarias que processam madeiras florestais nativas: o caso do município de Jaru, estado de Rondônia. **Cerne**, Lavras, MG, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2003. Disponível em: http://ciflorestas.com.br/arquivos/doc_viabilidade_rondonia_5495.pdf. Acesso em: 9 fev. 2017.

PEREIRA, D. et al. **Fatos florestais da Amazônia 2010**. Belém, PA: Imazon, 2010. Disponível em: http://ift.org.br/wp-content/uploads/2014/11/FatosFlorestais_2010.pdf, Acesso em: 12 mar. 2017.

PEREIRA, D.; VERÍSSIMO, A. **Relatório analítico de oferta e demanda de madeira para a produção moveleira na Região Norte (Amapá, Pará, Rondônia e Tocantins)**. Belém, PA: Imazon, 2010. (Relatório Técnico).

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Resíduos do setor madeireiro: aproveitamento energético. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 199-208, 2004. Disponível em: <http://www.renabio.org.br/09-B&E-v1-n2-2004-199-208.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2017.

PIOVESAN, P. R. R.; SOUZA, A. R. S. R.; SOUZA, D. V. Rendimento na produção de madeira serrada de *Handroanthusalbus* (*Handroanthussp*). **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, GO, v. 9, n. 17, p. 2315-2329, 2013. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/rendimento%20na%20producao.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2017.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 10 jul. 2017

RIBEIRO, J.; ROCHA, A. A. Avaliação ambiental e econômica da produção de madeira da espécie nativa em dois municípios na Amazônia brasileira. **InterfacEHS**, São Paulo, SP, v. 4, n. 3, p. 1-26, 2009. Disponível em: <http://producao.usp.br/handle/BDPI/14227>. Acesso em: 2 mar. 2017

ROCHA, M. P. **Técnicas de planejamento em serrarias**. Curitiba, PR: FUPEF, 2002. (Série Didática, 2).

ROCHA, M.; TOMASELLI, I. Efeito de modelo de corte nas dimensões de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 8, n. 1, p. 94-103, 2001. Disponível em: <http://www.floram.org/files/v8n%C3%BAnico/v8nunicoa12.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2017.

SANTANA, A. C. et al. O valor econômico da extração manejada de madeira nobaixa amazonas, Estado do Pará. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 527-536, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300015>.

SANTOS, S. H. M. **Cumaru *Dypterix odorata* Willd.** família Leguminosae. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/38555/1/Cumaru.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2017.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB; INSTITUTO DOHOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA - IMAZON (Orgs.). **A atividade madeireira na Amazônia brasileira**: produção, receita e mercados. Belém, PA: SFB; Imazon, 2010. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/miolo_resexec_polo_03_95_1.pdf. Acesso em: 12 mar. 2017.

SILVA, G. F. et al. Rendimento em laminação de madeira de Paricá na região de Paragominas, Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 25, n. 2, p. 447-455, 2015. <https://doi.org/10.5902/1980509818464>.

SILVA, J. C.; ALMEIDA, A. N.; POMPERMAYE, R. S. Análise estratégica do manejo florestal na Amazônia brasileira. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 44, n. 3, p. 341-348, 2014. <https://doi.org/10.5380/rf.v44i3.33979>.

SILVA, L. F.; SILVA, M. L.; CORDEIRO, S. A. Análise do mercado mundial de madeiras tropicais. **Revista Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 21, n. 3, p. 48-54, 2012. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/245/205>. Acesso em: 8 fev. 2017.

SOUZA, C. I. F. **Rendimento do desdobro de toras, utilização dos resíduos e otimização do tempo de trabalho com uma serraria portátil (Lucas Mill) numa comunidade rural na Amazônia**. 2006. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Universidade Federal da Amazônia. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp045173.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2017.

STEELE, P. H. **Factors determining glumber recovery in sawmilling**. Madison: U.S. Department of Agriculture; Forest Service; Forest Products Laboratory, 1984. Disponível em: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr39.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2017.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION - ITTO. **Sustaining tropical forests**. Annual Report. 2017. Disponível em: <http://www.itto.int>. Acesso em: 4 jul. 2017.

TONINI, H.; FERREIRA, L. M. M. **Rendimento em madeira serrada de cupiúba (*Goupia glabra*), caferana (*Erisma uncinatum*) e angelim-pedra (*Dinizia excelsa*)**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2004. (Embrapa Roraima. Comunicado Técnico, 7). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/67170/1/cot00704-rendimentoserraria-helio.doc>. Acesso em: 22 abr. 2017.

VERÍSSIMO, A. et al. **Áreas para produção florestal manejada**: detalhamento do macrozoneamento ecológico econômico do estado do Pará. Belém, PA: Imazon, 2006. Disponível em: <http://191.98.188.189/Fulltext/8704.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2017.

VERÍSSIMO, A. et al. **O setor madeireiro do Amapá**: situação atual e perspectivas para o desenvolvimento sustentável. Belém: Imazon, 1999. 44 p.

VERÍSSIMO, A. et al. Zoning of timber extraction in the Brazilian Amazon: a test case using Pará state. **Conservation Biology**, Amsterdam, v. 12, n. 1, p. 128-136, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.96234.x>.

VERÍSSIMO, A.; LENTINI, M.; LIMA, E. **Pólos madeireiros do estado do Pará**. Belém: Imazon, 2002.

VIDAL, E. et al. Vine management for reduced-impacts logging in Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 98, n.2, p. 105-114, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00051-0).

WILLISTON, E. M. **Small log sawmills**. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1981.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM VOLUMÉTRICA DE MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS

1. INTRODUÇÃO

Entre os estados da Amazônia Legal, o Estado do Amapá apresenta-se como o sexto maior produtor de madeira serrada, ficando à frente apenas de Roraima e Acre (SFB; IMAZON, 2010). Com aproximadamente 70% de sua cobertura florestal intacta, possui um elevado volume e diversidade de madeiras de importância comercial, o que resultou em criação de florestas públicas federais e estaduais para promoção do manejo florestal sustentável (RABELO et al., 2008; IBGE, 2012; IEF, 2017).

Muito embora o setor madeireiro na Amazônia tenha sido estudado desde os anos 1960 (VERÍSSIMO et al., 1999; VERÍSSIMO et al., 2002; LENTINI et al., 2005, PEREIRA et al., 2010; SANTOS et al., 2013; VERÍSSIMO; PEREIRA, 2014), a quantificação volumétrica das espécies amazônicas no Amapá ainda é efetuada com base no fator de forma de 0,7 proposto por Heinsdijk e Bastos (1963). Esse valor foi empregado de forma generalizada para diferentes espécies, sítios, formações e tipologias florestais, ocasionando erros sistemáticos na cadeia produtiva desde o manejo florestal ao produto serrado nas indústrias de transformação (ROLIM et al., 2006; LIMA et al., 2014; CYSNEIROS et al., 2017).

Até o momento, nas florestas nativas do Amapá, as estimativas indiretas de produção madeireira são obtidas apenas considerando o volume comercial do tronco (“árvore em pé”) sem o uso de modelos preditivos genéricos e/ou específicos. Por outro lado, em relação a produção volumétrica de madeira serrada, as informações ainda são escassas, o que de fato contribui com a carência de estatísticas precisas para a região e principalmente para o Amapá no que tange às indústrias que processam madeira.

Estimativas precisas do volume de madeira serrada tornam-se um importante indicador de produção de uma espécie na serraria e conseqüentemente geram informações úteis sobre a quantidade de produtos serrados, geração de resíduos e, não menos importante, dão suporte para estimativa do valor monetário (custos e receitas) do produto. O volume serrado é obtido por meio das medidas de largura (L),

espessura (E) e comprimento (C) de determinado produto. A soma dos volumes de todos os produtos gerados no desdobro das toras compõe o volume serrado total de uma espécie ou de um conjunto de espécies.

Neste contexto, o desenvolvimento e aplicação de equações de volume de madeira serrada pode se tornar fundamental na quantificação indireta de produtos, bem como gerar informações confiáveis de valoração a partir das medidas da madeira em tora. No intuito de preencher esta lacuna, a análise de regressão tem sido utilizada com ênfase na solução de grande parte dos problemas florestais, especialmente quando se pretende obter estimativas a partir de relações biométricas (SCHNEIDER et al., 2009). Assim, as equações de volume são obtidas após o ajuste de modelos estatísticos que relacionam uma variável de difícil obtenção, neste caso o volume de madeira serrada, com variáveis mais facilmente mensuráveis e conseqüentemente mais baratas como o diâmetro médio, comprimento e volume da tora, embora esta última não seja muito empregada (COUTO; BASTOS, 1987; GOMES; GARCIA, 1993).

Atualmente, a política de concessão de florestas públicas para o desenvolvimento do setor florestal no Estado do Amapá visa regulamentar e aumentar a produção de madeira, e por esse motivo, a obtenção do volume de madeira serrada é fundamental para nortear os planos de ação das indústrias que serão abastecidas. Assim, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de gerar equações de volume de madeira serrada para espécies comerciais no Amapá por meio de ajuste e seleção de modelos de regressão.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do local de estudo e seleção das espécies

O trabalho foi desenvolvido em uma serraria de médio porte que processa até 20.000 m³ de madeira em tora por ano. A serraria está localizada na zona rural do Município de Porto Grande, Amapá (00° 41' 53,91" N e 51° 26',4,27" O), distante aproximadamente 130 km de Macapá-AP. O acesso se dá pela Rodovia Perimetral Norte km 02.

Foi avaliado a produção volumétrica de madeira em tora e serrada de dez espécies comerciais que, além de serem estabelecidas pelo mercado consumidor

como as mais trabalhadas, são as que apresentaram processamento de mais de 50 toras durante o período analisado. Essas espécies também são provenientes das explorações autorizadas nos planos de operação anual e apresentam bom retorno econômico para a empresa, a saber: *Dinizia excelsa* Ducke (Angelim vermelho), *Dipteryx odorata* L. (Cumarú), *Manilkara huberi* L. (Massaranduba), *Carapa guianensis* Aubl. (Andiroba), *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim pedra), *Goupia glabra* Aubl. (Cupiúba), *Handroanthus albus* Vahl. Nichols. (Ipê), *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá), *Ocotea rubra* Mez (Louro vermelho) e *Vochysia guianensis* Aubl. (Quarubatinga).

2.2 Amostragem e coleta de dados

2.2.1 Volume de madeira em tora

Para cada espécie foram selecionadas aleatoriamente 50 toras com diâmetro médio maior que 50 cm. Em cada tora, foram mensurados os diâmetros da base e do topo com casca além do comprimento total e estimado o volume por meio de cubagem rigorosa. Foram realizadas também as medições do oco, medindo-se em cruz os diâmetros que as dimensões ocupavam na tora. Nas toras que não apresentavam distorções no comprimento foram realizadas apenas uma medição.

Foi realizado o cálculo de suficiência amostral para ter a estimativa do número ótimo de toras que seriam representativas para compor o estudo de modelagem de volume serrado. Para todos os casos foi adotado um limite erro admissível de 10% com probabilidade de erro de 5%. Assim, considerou-se os dados para uma população infinita de acordo a Equação 1.

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 S^2}{E^2 + \frac{t_{\alpha}^2 S^2}{N}} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que: n = número ótimo de toras; t = valor tabelado do teste t de Student ($\alpha = 0,05$); S^2 = variância da amostra; E = limite de erro admissível (10%); N = número total de toras mensuradas (50).

A estimativa do volume das toras foi efetuada de acordo com o que preceitua a Resolução nº 411 CONAMA, de 06 de maio de 2009. O volume foi calculado individualmente pelo método geométrico de Smalian (Equação 2).

$$V_i = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) \times L \quad \text{Eq. (2)}$$

em que: V_i = volume da tora i ; g_i = área transversal da base da tora i em m^2 ; g_{i+1} = área transversal do topo da tora i em m^2 ; L = comprimento da tora i em m.

2.2.2 Volume de madeira serrada

A madeira em tora de cada espécie foi transformada, por meio de desdobro tangencial em serra-fita vertical, gerando produtos de diversos formatos e dimensões de acordo com a demanda comercial da serraria. Muito embora o IBAMA (2009) padronize as peças e produtos em dimensões definidas, o desdobro das toras das espécies geraram produtos, em sua maioria, definidos como ripas (com dimensões variando de 0,01 a 0,040 cm de espessura), caibros (0,2 a 0,40 cm de largura) e tábuas e sarrafos com larguras e espessuras maiores que a 4 cm. O comprimento total de cada produto não ultrapassou 10 m de acordo com a definição do seccionamento no romaneio das toras.

As medidas de espessura (E), em cada extremidade, foram obtidas com auxílio de um paquímetro. As medidas de largura (L), uma em cada extremidade do produto e o comprimento (C), foram mensuradas com auxílio de trena. O volume de cada produto foi determinado por meio da Equação 3.

$$V_p = E \times L \times C \quad \text{Eq. (3)}$$

Após a determinação dos volumes dos produtos, os mesmos foram somados, obtendo-se o volume em madeira serrada para cada tora processada.

2.3 Modelagem estatística

Um primeiro esforço foi despendido na análise exploratória dos dados e principais medidas descritivas para as variáveis dendrométricas de cada espécie foram analisadas. Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,01$) sobre os dados de volume serrado para todas as espécies analisadas com o intuito de verificar a

normalidade. Quando verificado a não normalidade e/ou variâncias heterogêneas foi realizado a transformação logarítmica. Para verificar a distribuição e simetria do volume de madeira serrado para cada espécie foi utilizado a técnica de box-plot.

Para a estimativa de volume de madeira serrada, os modelos foram adaptados a partir dos modelos volumétricos comuns e usuais na região Amazônica (SILVA et al., 1984; ROLIM et al., 2006; BARROS e SILVA JUNIOR, 2009; HIGUCHI et al., 2015). Além disso, na análise de regressão foi realizada a inclusão da variável volume da tora como preditora para do volume de madeira serrada. Assim, foram testados 16 modelos estatísticos definidos em simples e múltiplos (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos testados para estimativa de volume de madeira serrada para espécies comerciais no Amapá.

Modelo	Expressão	Tipo de entrada
1	$Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$	Simple
2	$Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$	Simple
3	$Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$	Múltipla
4	$Vms = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$	Simple
5	$Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$	Múltipla
6	$Vms = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$	Múltipla
7	$\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$	Múltipla
8	$\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$	Múltipla
9	$Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$	Simple
10	$Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$	Simple
11	$Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$	Simple
12	$Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$	Simple
13	$\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$	Múltipla
14	$\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$	Simple
15	$Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$	Múltipla
16	$Vms = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$	Múltipla

Em que: β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; Vms = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e \ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Os parâmetros dos modelos aritméticos (1-15) foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, sendo verificada as suas significâncias por meio do teste t ($\alpha = 0,05$). O modelo não linear (16) foi ajustado por meio da modificação do algoritmo Levenberg-Marquardt utilizando-se o pacote *minipack.lm*. Todas as análises foram realizadas com o auxílio do Software R® (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017).

As equações ajustadas foram analisadas por meio de comparações dos seguintes critérios estatísticos (VANCLAY 1994; SCHNEIDER et al. 2009):

– Critério de Informação de Akaike (AIC):

$$AIC = -2LL + 2k \quad \text{Eq. (4)}$$

em que: LL é a log-verossimilhança e k é o número de parâmetros do modelo. Este critério penaliza a adição de parâmetros nos modelos analisados. Indica a qualidade do ajuste pelas equações. A melhor equação minimiza o valor do AIC.

– Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}):

$$R^2_{aj} = R^2 - \left[\frac{k-1}{n-k} \right] \times (1 - R^2) \quad \text{Eq. (5)}$$

em que: R^2 = coeficiente de determinação; k e n já definidos anteriormente. Por esse critério, quanto mais próximo de um (1,0) ou 100 % for o valor do coeficiente de determinação ajustado, maior será a variação total dos dados explicada pela Equação 5.

– Raiz quadrada do erro médio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. (6)}$$

em que V_i é o volume de madeira serrada de cada tora (i); \hat{V}_i estimativa dos volumes serrados e n , o número total de observações. A raiz quadrada do erro médio indica a diferença média quadrática entre os valores observados e estimados. Quanto menor o RMSE, melhor a precisão da estimativa (MEHTÄTALO et al., 2006)

- Bias:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n} / \bar{V} \quad \text{Eq. (7)}$$

Bias indica uma tendência de sub ou superestimação, sendo uma medida de erro e medida de qualidade das equações validadas, de modo que, quanto menor o seu valor, maior a eficiência nas generalizações.

A melhor equação para cada espécie foi escolhida por meio da ponderação dos critérios estatísticos no ranking de classificação. O valor ponderado foi determinado com o objetivo de resumir os resultados e tornar o processo de seleção mais fácil. Desta forma, foram atribuídos valores ou pesos para as estatísticas calculadas para as equações ajustadas em cada espécie. As estatísticas foram classificadas de acordo com sua eficiência sendo atribuído peso 1 para a mais eficiente e pesos crescentes para as menos eficientes. Assim, no caso de selecionar uma equação entre as 16 testadas, considerando-se, por exemplo, o critério de informação de

Akaike (AIC), atribui-se valor 1 para a melhor estatística (menor valor de AIC) e valores crescentes para as demais, observando-se a ordem de classificação. Para os demais critérios estatísticos se utilizou o mesmo raciocínio, classificando em ordem crescente e atribuindo valores ou pesos por ordem de classificação. O valor ponderado foi obtido conforme a equação 8.

$$WV = \sum_{i=1}^n N_r \times W_i \quad \text{Eq. (8)}$$

em que: WV é o valor ponderado da equação no ranking; W_i é a ponderação da posição i ; N_r é o número de registros que foram obtidos na posição i . A melhor equação é aquela que apresentar o menor WV .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O volume serrado total obtido para as espécies foi 519,92m³ com uma média de 1,04 m³ e erro padrão da média de 0,53 m³ (Tabela 2). De modo geral, esses resultados estão de acordo com os valores de erro padrão encontrados, sugerindo que a amostragem de 50 toras para cada espécie é representativa para o desenvolvimento do trabalho. O maior volume médio serrado e volume médio da tora sem oco foram obtidos para *D. excelsa*, justificando suas maiores dimensões em diâmetro. As espécies *H. albus*, *D. odorata* e *G. glabra* apresentaram os menores valores de volume serrado. O maior erro padrão da média foi obtido para *H. courbaril* o que pode indicar toras com produção volumétrica ligeiramente maior que as demais espécies, ficando atrás apenas de *D. excelsa*.

Tabela 2. Medidas descritivas, quantificação de produtos e volumetria obtidos no desdobro de 50 toras das 10 espécies comerciais analisadas em uma serraria de médio porte em Porto Grande, Amapá.

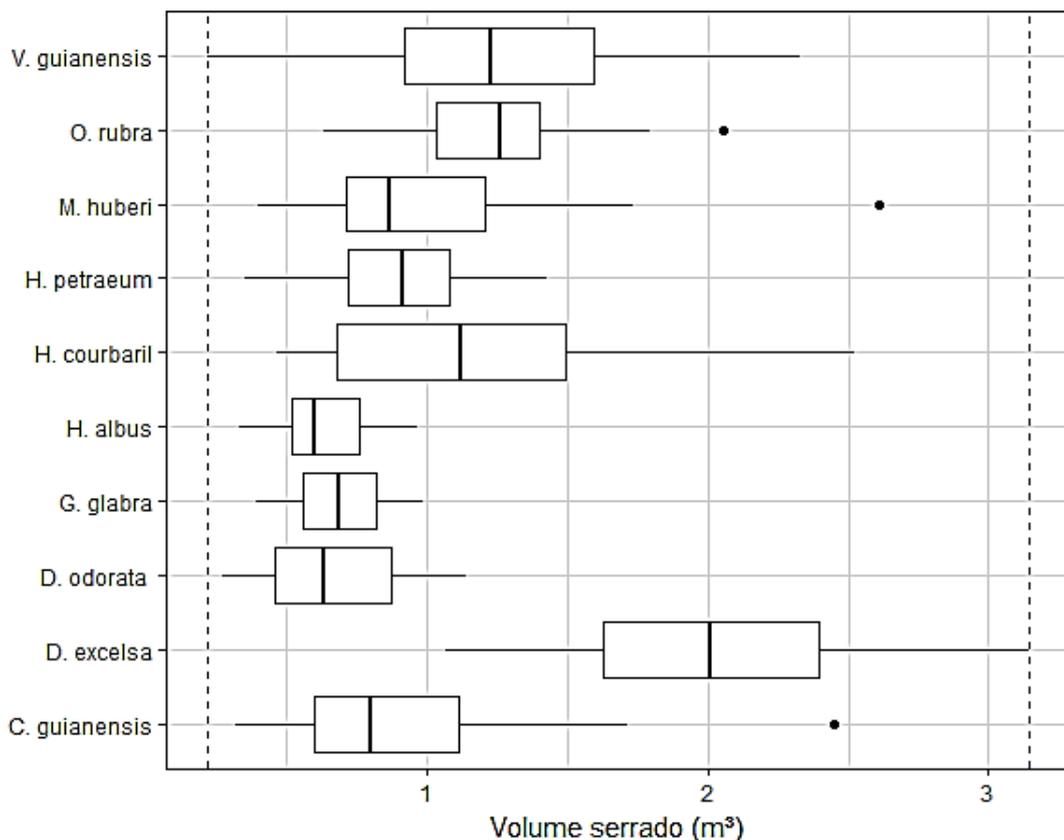
Espécies	Média		Quantidade		Volume médio (m ³) ± erro padrão	
	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	Toras	Produtos serrados	Tora sem oco	Serrado
<i>C. guianensis</i>	55,17	9,83	N = 50; n = 33	2643	2,39 ± 0,90	0,88 ± 0,40
<i>D. excelsa</i>	103,05	5,11	N = 50; n = 37	4551	3,66 ± 0,52	2,01 ± 0,50
<i>D. odorata</i>	62,23	5,52	N = 50; n = 37	3903	1,68 ± 0,43	0,67 ± 0,24
<i>G. glabra</i>	54,17	8,05	N = 50; n = 45	1994	1,73 ± 0,41	0,69 ± 0,17
<i>H. courbaril</i>	67,35	8,05	N = 50; n = 39	5943	2,91 ± 1,22	1,16 ± 0,53
<i>H. petraeum</i>	62,14	5,93	N = 50; n = 39	5000	1,63 ± 0,37	0,89 ± 0,26
<i>M. huberi</i>	58,69	8,87	N = 50; n = 40	4948	2,44 ± 0,99	0,98 ± 0,41
<i>O. rubra</i>	59,69	9,85	N = 50; n = 41	2655	2,75 ± 0,47	1,23 ± 0,29
<i>H. albus</i>	54,14	7,09	N = 50; n = 38	3143	1,64 ± 0,44	0,63 ± 0,16

<i>V. guianensis</i>	64,84	8,02	N = 50; n = 26	6020	2,63 ± 0,95	1,26 ± 0,49
Total	64,14	7,58		40800	2,35 ± 0,97	1,04 ± 0,53

N = Número de toras mensuradas para cada espécie; n = Número de toras que seriam suficientes para cada espécie ($p = 0,05$; GL = 49).

De maneira geral, 75% dos dados de volume serrado estão concentrados entre 0,46 e 2,4 m³ (Figura 1). Muito embora essa amplitude dendrométrica seja diferente entre as espécies, estes resultados foram obtidos sem a eliminação de *outliers*. Embora o box-plot forneça informação sobre locação e dispersão, seu verdadeiro valor está na informação que fornece sobre a cauda da distribuição. Valores discrepantes (*outliers*) podem afetar de forma adversa as decisões a serem tomadas a partir da análise dos dados se não forem devidamente considerados.

Figura 1. Box-plot do volume de madeira serrada para as dez espécies comerciais analisadas no Amapá. As linhas dentro das caixas indicam a mediana da distribuição. As linhas tracejadas em azul indicam o menor e maior quartil (25% e 75%) dos dados volumétricos.



Corroborando estes resultados, de acordo com o teste de normalidade ($\alpha = 0,01$), notam-se distribuições simétricas para *D. excelsa* (p -value = 0,728), *D. odorata* (p -value = 0,079), *G. glabra* (p -value = 0,098), *H. courbaril* (p -value = 0,013); *H.*

petraeum (p-value = 0,749), *O. rubra* (p-value = 0,675), *H. albus*: (p-value = 0,259), e *V. guianensis* (p-value = 0,202). As demais espécies sugerem um ligeiro desvio da normalidade com distribuições assimétricas, onde os valores de média e mediana do volume serrado não são similares.

Os resultados gerais obtidos no ajuste dos modelos e a ponderação estatística podem ser visualizados nos apêndices (1 a 10). De maneira geral, as equações que utilizam as medidas de volume da tora como variável explicativa apresentaram estimativas com maior precisão. Na Tabela 3, tem-se o resumo com os melhores ajustes obtidos para as espécies. As menores medidas de erro (RMSE e Bias) e AIC e maiores valores de R^2_{aj} , justificam a inclusão das variáveis comprimento e/ou volume da tora como preditoras, combinadas ou não com o diâmetro, nos modelos.

Tabela 3. Coeficientes e critérios estatísticos obtidos para as melhores modelos de volume de madeira serrada obtidas para as dez espécies analisadas no Amapá.

Espécies	Equação	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	AIC	R^2_{aj}	RMSE	Bias	GL
<i>C. guianensis</i>	16	5,7E-05	2,0068	0,6284	-	-	8,97	0,6116	0,2443	0,0021	2
<i>D. excelsa</i>	13	2,4103	-0,6814	1,0919	-	-	-59,36	0,7627	0,2097	0,0080	2
<i>D. odorata</i>	5	-1,6035	0,0226	0,1560	-	-	-55,71	0,6871	0,1280	0,0370	2
<i>G. glabra</i>	10	-0,1774	0,6416	-0,0785	-	-	-99,52	0,7509	0,0826	0,0136	2
<i>H. courbaril</i>	7	-10,0253	1,8300	1,1702	-	-	-21,90	0,8406	0,2304	0,0168	2
<i>H. petraeum</i>	15	-0,1991	0,6139	0,0015	-	-	-71,02	0,8106	0,1098	0,0267	2
<i>M. huberi</i>	11	-0,5773	1,0498	-0,2071	0,0183	-	-22,56	0,8015	0,1747	0,0417	3
<i>O. rubra</i>	14	-0,8852	1,0681	-	-	-	-31,78	0,5439	0,1874	0,0153	1
<i>H. albus</i>	12	-7,1347	18,7879	-16,9570	6,6887	-0,9610	-67,72	0,4732	0,1090	0,0324	4
<i>V. guianensis</i>	7	-8,7657	1,9065	0,4823	-	-	38,16	0,4157	0,3923	0,0624	2

Em todos os casos, os modelos finais selecionadas apresentaram seus coeficientes significativos pelo teste t ($\alpha = 0,05$). Embora as equações selecionadas para *G. glabra* (Modelo 10), *M. huberi* (Modelo 11), *O. rubra* (Modelo 14) e *H. albus* (Modelo 12) sugerem que apenas o volume da tora estime com maior precisão o volume serrado (modelo de simples entrada), o modelo de Schumacher e Hall apresentou estimativas eficientes para *H. courbaril* e *V. guianensis* (Modelo linear 7) sendo também o mais recomendado e para *C. guianensis* (modelo não linear 16). Neste caso, este resultado sugere a inclusão da variável comprimento da tora na estimação do volume serrado, pois os modelos que usam apenas o diâmetro como variável preditora assumem que árvores de diferentes diâmetros possuem mesmos comprimento do tronco (SCHUMACHER; HALL 1933), o que não é verdade nos

processamentos de madeira serrada de espécies comerciais amazônicas devido os diferentes produtos gerados (RIBEIRO et al., 2014; MELO et al., 2016).

As estimativas dos parâmetros associados a cada variável explicativa refletem elasticidades, ou seja, mostram a mudança proporcional no volume serrado para cada alteração porcentual na respectiva variável (SILVA; SANTANA, 2014). Por exemplo, no modelo 13 para *D. excelsa*, para cada variação de 1% no diâmetro da tora, tem-se uma variação de aproximadamente -0,68% no volume de madeira serrada, mantendo-se a influência do volume da tora fixa. Igualmente, a cada aumento de 1% no volume da tora, tem-se um incremento de 1,09% no volume serrado.

Entretanto, conforme mostrado nos apêndices (01 a 10) para todas as espécies (exceto para *H. albus*), a inclusão de duas ou mais variáveis explicativas no modelo 12, têm-se que os efeitos não foram aditivos, ou seja, não ocorre aumento na precisão dos escores estatísticos e nem na estimativa do volume serrado, logo, subentende-se que essas variáveis tendem a apresentar intercorrelação ou colinearidade (SCOLFORO, 2005; SILVA et al., 2009; VALENTE et al., 2011). Embora isto tenha acontecido, o teste t de Student torna-se importante na escolha de modelos com múltiplos parâmetros, mostrando um valor não diferente de zero e indicando que a variável não é relevante para explicar variações significativas na variável resposta (MAYER; BUTLER, 1993; RYKIEL JUNIOR, 1996; ROBINSON; FROESE, 2004; ADEKUNLE et al., 2013; LIMA et al., 2014; SILVA; SANTANA, 2014).

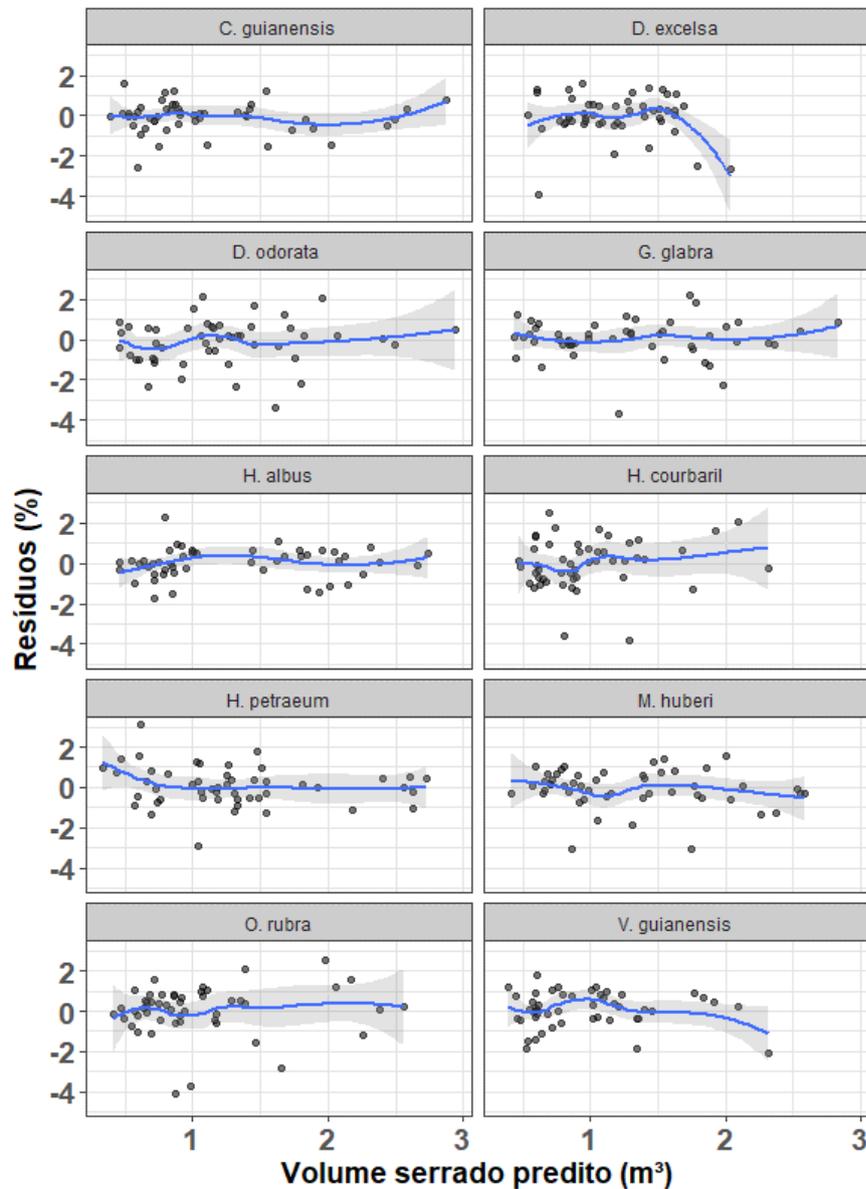
Os modelos que utilizam apenas o diâmetro da tora como variável explicativa resultaram em ajustes com menor precisão estatística para todas os casos. Para esses modelos, os menores valores de R^2_{aj} evidenciam uma baixa variação total explicada pelas regressões. Os maiores valores de erros da estimativa e critério de informação de Akaike justificam o maior viés (RMSE e Bias) na obtenção do volume serrado estimado, principalmente pelas equações geradas pelos modelos 1, 2 e 4 para todos os casos analisados. Além disso, os coeficientes dessas equações foram não significativos ao teste t ($\alpha = 0,05$), corroborando com os piores resultados no ranking de classificação.

Percebe-se que as equações selecionadas predizem o volume de maneira satisfatória para todas as espécies. Os menores valores de RMSE e Bias indicam pequenas tendências em sub ou superestimções nas previsões geradas. Essas estatísticas mostram boa medida do valor preditivo geral das equações de regressão

(AKINDELE; LEMAY, 2006). Draper e Smith (1998) também observaram que esses critérios são medida comuns de estimativas de qualidade em modelos de regressão, com valores baixos, indicando melhores previsões.

Nos gráficos de dispersão têm-se os resíduos contra os valores ajustados, com uma curva suave sobreposta principalmente nos maiores valores obtidos (Figura 2). Este tipo de gráfico reporta a curvatura (tendência ou viés) e valores discrepantes a partir do intervalo de confiança (ROBINSON; HAMANN, 2011). Para todas as espécies, não há evidências que preocupem a escolha das equações devido à baixa amplitude residual, no entanto deve-se considerar que os valores discrepantes sugerem uma curvatura causada possivelmente pelos erros do modelo e não dos dados selecionados no ajuste.

Figura 2. Distribuição residual das melhores equações para estimativa de volume de madeira serrada de dez espécies comerciais no Amapá.



A baixa amplitude residual e distribuição regular da nuvem de pontos em torno da linha de regressão sugerem homogeneidade de variância. Além disso, os menores valores ponderados das estatísticas de regressão, corroboram com a escolha das equações. Essa análise evidencia a elevada variabilidade das variáveis dendrométricas das espécies amazônicas e reforça o uso de equações específicas para cada espécie, uma vez que os maiores resíduos estiveram diretamente relacionados às toras e espécies de maior porte (BRANDEIS et al., 2006; LIMA et al., 2014; CYSNEIROS et al., 2017). Cabe ainda ressaltar que a utilização de toras de grande comprimento, oriundas de romaneio, não compromete o ajuste de modelos volumétricos, quando avaliadas em diferentes seccionamentos para cubagem e estimativa de volume da tora (RIBEIRO et al., 2014).

4. CONCLUSÕES

Estimativas precisas de volume de madeira serrada devem ser obtidas por modelos ajustados conforme a espécie considerada para desdobro.

Modelos que utilizam apenas a variável diâmetro da tora sugerem estimativas com menor precisão.

O volume da tora deve ser considerado como importante variável preditora para obtenção de volume serrado para as diferentes espécies comerciais amazônicas.

REFERÊNCIAS

ADEKUNLE, V. A. J. et al. Models and form factors for stand volume estimation in natural forest ecosystems: a case study of Katarniaghat Wildlife Sanctuary (KGWS), Bahraich District, India. **Journal of Forestry Research**, New York, v. 24, n. 2, p. 217-126, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11676-013-0347-8>.

AKINDELE, S. O.; LEMAY, V. M. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rainforest area of Nigeria. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, n. 1-3, p. 41-48, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.022>.

BARROS, P. L. C.; SILVA JÚNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta Tropical densa no município de Anapú, oeste do estado do Pará, Amazônia Oriental. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, PA, v. 51, p. 115-126, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/146/56>. Acesso em: 3 nov. 2016.

BRANDEIS, T. J. et al. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, n. 1, p. 133-142, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.012>.

COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de Eucalyptus no estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, SP, n. 37, p. 33-44, 1987. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr37/cap04.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2017.

CYSNEIROS, V. C. et al. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 295-304, 2017. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06>.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1998.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal. **IPEF Série Técnica**, Piracicaba, SP, v. 9, n. 26, p. 1-36, 1993. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr26/cap01.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2017.

HEINSDIJK, D.; BASTOS, A. M. **Inventários florestais na Amazônia**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura; Serviço Florestal; Setor de Inventários Florestais, 1963. (Boletim do Serviço Florestal, 6). Disponível em: http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i00022470_001.pdf. Acesso em: 22 jan. 2017.

HIGUCHI, F. G. et al. The use of natural fallen trees in mature tropical Amazonian forest for volumetric regression analysis and volume equations adjustment. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Amman, v. 9, n. 31, p. 342-348, 2015. Disponível em: <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2015/September/342-348.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2017.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB; INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA - IMAZON (Orgs.). **A atividade madeireira na Amazônia brasileira**: produção, receita e mercados. Belém, PA: SFB; Imazon, 2010. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/miolo_resexec_polo_03_95_1.pdf. Acesso em: 12 mar. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Comunicado às empresas do setor madeireiro e demais atividades relacionadas ao consumo de madeira**. Brasília, DF: IBAMA, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2012. (IBGE. Manuais Técnicos em Geociências, 1). Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2017.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DO AMAPÁ - IEF. **Plano anual de outorga florestal do estado do Amapá – PAOF 2017**. Macapá, AP: IEF, 2017. Disponível em: <https://ief.portal.ap.gov.br/dados.php?d=756&a=460>. Acesso em: 3 jan. 2017.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. **A expansão madeireira na Amazônia**. Belém, PA: Imazon, 2005. Disponível em: <http://www.portalces.org/sites/default/files/a-expansao-madeireira-na-amazonia.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2017.

LIMA, R. B. et al. Volumetria e classificação da capacidade produtiva para *Mora paraenses* (Ducke) no estuário amapaense. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 42, n. 101, p. 141-154, 2014. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=13&Number=101>. Acesso em: 20 jul. 2017.

MAYER, D. G.; BUTLER, D. G. Statistical validation. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 68, n. 1-2, p. 21-32, 1993. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90105-2).

MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M.; KANGAS, A. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 3, p. 501-516, 2006. Disponível em: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf403501.pdf>. Acesso em: 11 maio 2017.

MELO, R. R. et al. Análise da influência do diâmetro no rendimento em madeira serrada de camará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 88, p. 393-398, 2016. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1151>.

PEREIRA, D. et al. **Fatos florestais da Amazônia 2010**. Belém, PA: Imazon, 2010. Disponível em: http://ift.org.br/wp-content/uploads/2014/11/FatosFlorestais_2010.pdf, Acesso em: 12 mar. 2017.

RABELO, B. V. et al. **Macrodiagnóstico do Estado do Amapá**: primeira aproximação do ZEE. 3. ed. Macapá, AP: IEPA, 2008. Disponível em: <http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2017.

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, MG, v. 20, n. 4, p. 605-612, 2014. <https://doi.org/10.1590/01047760201420041400>.

ROBINSON, A. P.; FROESE, R. E. Model validation using equivalence tests. **Ecological Modelling**, Kidlington, v. 176, n. 3-4, p. 349-358, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.013>.

ROBINSON, A. P.; HAMANN, J. D. **Forest Analytics with R: a introduction**. New York: Springer, 2011.

ROLIM, S. G. et al. Modelos volumétricos para a Floresta Nacional do Taipé-Aquirí, Serra dos Carajás. **Acta Amazonica**, Manaus, AM, v. 36, n. 1, p. 106-114, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000100013>.

SANTOS, D.; PEREIRA, D.; VERÍSSIMO, A. **O estado da Amazônia: uso da terra**. Belém, PA: Imazon, 2013. Disponível em: http://www.fundovale.org/wp-content/uploads/2016/04/Imazon_OEA_USOTERRA.pdf. Acesso em: 21 jan. 2017.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS, 2009.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933. Disponível em: <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968352/PDF>. Acesso em: 10 jul. 2017.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2005. pt. 1/2.

SILVA, A. V. L. et al. Alternativa de modelo linear para estimação da biomassa verde de *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J.C. Wendl na existência de multicolinearidade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 19, n. 2, p. 207-214, 2009. <https://doi.org/10.5902/19805098411>.

SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 61, n. 5, p. 631-636, 2014. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461050005>.

SILVA, J. N. M. et al. Equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, PR, n. 8/9, p. 50-63. 1984. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/5024/1/jnsilva3.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2017.

VALENTE, M. D. R. et al. Modelo de predição para o volume total de Quaruba (*Vochysia inundata* Ducke) via análise de fatores e regressão. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 307-317, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000200015>.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Wallingford: CAB International, 1994.

VERÍSSIMO, A. et al. **O setor madeireiro do Amapá**: situação atual e perspectivas para o desenvolvimento sustentável. Belém, PA: Imazon, 1999.

VERÍSSIMO, A.; LENTINI, M.; LIMA, E. **Pólos madeireiros do estado do Pará**. Belém, PA: IMAZON, 2002.

VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. Produção na amazônia florestal: características, desafios e oportunidades. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF, v. 19, n. 38, p. 13-44, 2014. Disponível em: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/731/671. Acesso em: 16 mar. 2017.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia deste trabalho de tese é compreender o quão rentável pode ser a atividade madeireira no Amapá, conhecendo o estado da arte das estimativas de produção volumétrica bruta e serrada como subsídios para o Manejo florestal. Em síntese, os capítulos desta pesquisa foram amplamente embasados e documentados em trabalhos cuja referência seja sobre a atividade madeireira na Amazônia e os principais fatores que influenciam a produção de madeira sustentável.

O manejo das florestas naturais tem despendido um esforço muito grande para conciliar ecologia dos ecossistemas, geração de bens e serviços e desenvolvimento tecnológico. Com o intuito de melhorar os estudos sobre esta temática, instituições públicas e privadas vêm apresentando inúmeras parcerias para atender a grande demanda da sociedade - desenvolvimento sustentável.

Conciliar produção contínua de madeira, garantindo o mínimo de impacto ambiental é tarefa que vem sendo adotada por algumas empresas na região amazônica desde a década de 80. No entanto, pesquisas que garantem que a floresta é um recurso natural sustentável no período de 30 a 35 anos ainda são insipientes.

Desta maneira, o conhecimento gerado sobre a produção de madeira bruta e madeira serrada por meio de estimativas precisas e predições consistentes é fundamental para garantir que os empreendimentos florestais possam perpetuar suas atividades. Não menos importante, tais informações são essenciais para o funcionamento legal das indústrias de transformação ao mesmo que assegura uma produção contínua de produtos da floresta planejando o mínimo de impacto no ecossistema.

Estudos sobre a valoração da floresta por meio de modelagem estatística são escassos, necessitando de metodologias mitigadoras para comprovar a hipótese de que o manejo da floresta é tão rentável quanto às atividades de mineração e agropecuária. Atualmente, a economia florestal no Brasil é garantida em sua grande totalidade por manejo de florestas de Eucalipto. Não obstante, na região amazônica, esta lacuna pode ser preenchida com os estudos sobre estimativas de produção volumétrica em nível local e espécies.

Pesquisas sobre os valores reais de produção de madeira e implementação do plano de manejo florestal, desde a aquisição de terras, elaboração do PMFS,

investimentos em infraestrutura, tratamentos silviculturais, até a comercialização, devem ser realizados e discriminados de modo que caracterizem a máxima e mínima produção. Outrossim, a investigação de diferentes metodologias de processamento e desdobro da madeira tropical considerando técnicas de pesquisa operacional devem ser realizadas visando a obtenção resultados que garantem o aumento da produção.

Dentre as espécies comerciais, espera-se obter lucro significativo a partir do manejo e processamento otimizado. A produção em escala de tempo será caracterizada a partir dos dados de inventário, colheita e processamento das espécies aptas ao manejo.

Assim, para o Estado do Amapá, este estudo poderá ser base para o desenvolvimento e aplicação de novos métodos que visem comprovar que a produção de madeira por meio de plano de manejo florestal é mais rentável que outras atividades de uso da terra, havendo necessidade de uma avaliação criteriosa em bases econômicas, fundamentada nos aspectos político, ecológico, social e tecnológico.

APÊNDICES

Apêndice 1. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Carapa guianensis*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,534258	0,025717				24,7861	0,297999	0,43383	0,291978	0,099162	1
2	0,305437	-0,00405	0,000255			26,0852	0,299049	0,429832	0,289939	0,101103	2
3	-5,011	5,372	0,021			17,5792	0,274663	0,519028	0,266296	0,08027	2
4	1,898	0,2207				24,0981	0,295955	0,441567	0,289976	0,100661	1
5	-1,290302	0,028428	0,06171			18,4012	0,27693	0,511055	0,268494	0,076116	2
6	-1,967	0,2449	3,097			17,6504	0,274859	0,518342	0,266486	0,078707	2
7	-8,6289	1,7031	0,7131			22,4086	0,288253	0,530918	0,269497	0,040602	2
8	-8,7034	0,8282				20,8313	0,286443	0,53679	0,271513	0,041001	1
9	0,11997	0,32021				16,1034	0,273216	0,524084	0,267696	0,08125	1
10	0,167625	0,280826	0,007132			18,0677	0,276009	0,514305	0,2676	0,082328	2
11	0,050818	0,43612	-0,054744	0,007436		20,0289	0,278884	0,504131	0,267496	0,081818	3
12	-0,90411	2,2197	-1,19198	0,304	-0,02696	21,4844	0,280435	0,498602	0,266044	0,080603	4
13	-1,8886	0,2769	0,7131			22,4083	0,288253	0,53092	0,269495	0,040602	2
14	-0,87496	0,82824				20,8310	0,286443	0,536793	0,27151	0,041001	1
15	-0,050085	0,267329	0,005371			17,5783	0,274661	0,519036	0,266294	0,080269	2
16	5,710E-05	2,01E+00	0,6284297			8,9688		0,6116	0,244326	0,00214	2

Em que: 1 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\text{Ln}Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\text{Ln}Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\text{Ln}Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\text{Ln}Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $Vms = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; β_i = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; Vms = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 2. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Dinizia excelsa*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	4,226279	-0,021545				45,406068	0,36624	0,465312	0,35884	0,037504	1
2	10,6049504	-0,1484086	0,0006158			44,912928	0,361002	0,480497	0,350005	0,034928	2
3	1,996	-2,399	0,04897			-0,272793	0,229758	0,789569	0,222759	0,015066	2
4	3,131	-0,1035				46,289286	0,369489	0,455783	0,362024	0,038271	1
5	-2,981086	0,024259	0,486578			-4,072972	0,221191	0,80497	0,214452	0,014989	2
6	-9,303	0,08709	4,013			2,214935	0,235545	0,778834	0,22837	0,018019	2
7	-7,0757	1,2495	1,2418			-58,977629	0,127738	0,76094	0,211757	0,008067	2
8	-10,7269	1,0521				-0,083799	0,232384	0,20881	0,441168	0,027284	1
9	-0,89424	0,79336				20,750551	0,286212	0,673453	0,28043	0,023201	1
10	1,5207	-0,5714	0,1889			19,554874	0,280144	0,687154	0,27161	0,024127	2
11	-2,8722	3,2943	-0,9195	0,1037		20,859109	0,281209	0,68477	0,269726	0,023839	3
12	-9,26133	11,0029	-4,32511	0,75806	-0,04621	22,806596	0,284167	0,678103	0,269585	0,023787	4
13	2,4103	-0,6814	1,0919			-59,357330	0,127254	0,762749	0,209746	0,008014	2
14	-1,1443	1,4063				-37,816158	0,159344	0,628001	0,278767	0,013208	1
15	1,047032	0,622485	-0,012777			-4,910606	0,219346	0,80821	0,212663	0,014367	2
16	0,000814607	1,33539	1,05163			10,684520		0,6523	0,248555	0,000708	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e \ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 3. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Dipteryx odorata*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,368771	0,016621				-10,05637	0,21033	0,20532	0,20608	0,11601	1
2	1,5543698	-0,0467359	0,0005157			-8,409457	0,2118	0,19413	0,20535	0,11482	2
3	1,51	-5,71	0,04065			-54,98461	0,13294	0,68252	0,12889	0,04432	2
4	1,332	0,1359				-10,217346	0,20999	0,20788	0,20575	0,11551	1
5	-1,603508	0,022636	0,155994			-55,708527	0,13198	0,68708	0,12796	0,037	2
6	-4,833	0,186	1,333			-52,464029	0,13633	0,6661	0,13218	0,04064	2
7	-12,4147	2,3023	1,4457			-13,917498	0,20045	0,73022	0,13222	0,01853	2
8	-13,153	1,276				-13,095848	0,20403	0,7205	0,13502	0,0193	1
9	-0,1025	0,45695				-54,708815	0,13458	0,67465	0,13186	0,04534	1
10	-0,42359	0,84498	-0,11026			-54,238191	0,13394	0,67774	0,12986	0,03921	2
11	-0,9038	1,769	-0,6729	0,1087		-52,519442	0,13501	0,67258	0,12949	0,03845	3
12	3,1487	-8,6291	8,9181	-3,6761	0,5412	-52,086457	0,13437	0,67563	0,12748	0,03789	4
13	1,2505	-0,5892	1,4457			-13,917648	0,20045	0,73022	0,13222	0,01853	2
14	-1,09708	1,27545				-13,095356	0,20403	0,7205	0,13502	0,0193	1
15	0,15107	0,51751	-0,00571			-54,984827	0,13294	0,68252	0,12889	0,04432	2
16	0,000552974	1,23204	1,13331			-43,97081		0,6204	0,143899	0,004447	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 4. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Goupia glabra*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	0,6395892	0,0008445				-29,9767	0,17234	-0,0201	0,168857	0,06643	1
2	-4,063507	0,176207	-0,00162			-30,6621	0,16955	0,01263	0,164382	0,06373	2
3	3,918	-7,5	0,03008			-88,6791	0,09491	0,69058	0,092022	0,01827	2
4	6,709	0,004888				-29,9562	0,17237	-0,0206	0,168891	0,06642	1
5	-0,885878	0,016769	0,082369			-80,1182	0,1034	0,63279	0,100247	0,02201	2
6	-7,92	0,1474	4,788			-72,6094	0,11146	0,57329	0,108064	0,02657	2
7	-7,7147	1,3202	0,9931			-47,1626	0,14376	0,6865	0,094128	0,00979	2
8	-9,49285	0,90561				-40,3129	0,15541	0,6336	0,099997	0,01187	1
9	0,05297	0,36525				-100,1654	0,08542	0,74938	0,083694	0,01498	1
10	-0,17741	0,64157	-0,07851			-99,5223	0,08516	0,7509	0,082566	0,01363	2
11	0,772	-1,0886	0,9295	-0,1885		-98,3059	0,08541	0,74945	0,081921	0,01369	3
12	-1,3205	4,0618	-3,6982	1,6125	-0,2564	-96,5053	0,08618	0,7449	0,081758	0,01356	4
13	-0,935537	0,008978	0,941291			-64,0476	0,12142	0,77635	0,083641	0,00694	2
14	-0,89976	0,94134				-66,0449	0,12015	0,78099	0,083686	0,00694	1
15	0,0082063	0,3652426	0,0008267			-98,2976	0,08621	0,74473	0,083583	0,01501	2
16	0,000735608	1	0,7082805			-80,3672		0,6489	0,099997	-0,0023	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 5. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Himeneaea courbaril*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,625388	0,026526				58,39314	0,41703	0,36996	0,4086	0,1441	1
2	-4,538	2,163	0,03385			60,37755	0,42138	0,35675	0,40854	0,14436	2
3	5,16	-1,044	0,03634			4,06749	0,23995	0,79142	0,23264	0,0386	2
4	3,134	0,181				58,67569	0,41821	0,36639	0,40976	0,1465	1
5	-2,188613	0,031166	0,155413			5,06500	0,24236	0,78722	0,23497	0,03177	2
6	-4,629	0,2158	8,826			11,64330	0,25883	0,7573	0,25095	0,04528	2
7	-10,0253	1,83	1,1702			-21,89859	0,18508	0,8406	0,23038	0,01676	2
8	-10,49339	1,00993				-18,75790	0,1928	0,82702	0,24655	0,01808	1
9	0,05669	0,37897				7,13158	0,24977	0,77399	0,24472	0,04558	1
10	-0,31827	0,63939	-0,03855			5,08789	0,24241	0,78712	0,23503	0,03302	2
11	-0,074379	0,383323	0,04033	-0,007276		6,75455	0,24422	0,78394	0,23424	0,03414	3
12	1,64375	-2,01137	1,16919	-0,22332	0,01435	6,74861	0,24201	0,78782	0,22959	0,03397	4
13	1,0357	-0,5105	1,1702			-21,89833	0,18508	0,8406	0,23038	0,01676	2
14	-0,94758	1,00993				-18,75716	0,1928	0,82701	0,24656	0,01808	1
15	0,515996	0,462705	-0,010443			4,06830	0,23995	0,79142	0,23264	0,0386	2
16	0,000170811	1,52696	1,07676			11,09741		0,7697	0,24958	-0,0033	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 6. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Hymenolobium petraeum*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,655152	0,024938				-13,31234	0,20359	0,38795	0,19948	0,06455	1
2	5,62193	-0,1821896	0,0016889			-15,20573	0,19789	0,42175	0,19186	0,0608	2
3	-1,991	1,488	0,04821			-71,01444	0,11325	0,81061	0,1098	0,02668	2
4	9,119	0,2058				-14,17205	0,20185	0,39838	0,19777	0,06359	1
5	-2,169405	0,03417	0,174575			-67,44455	0,11737	0,79659	0,11379	0,02383	2
6	-6,786	0,2845	1,54			-67,795	0,11696	0,79801	0,11339	0,02369	2
7	-12,0223	2,4269	1,1133			-31,18779	0,16866	0,72577	0,11031	0,015	2
8	-11,81	1,175				-32,71282	0,16769	0,72892	0,11026	0,01531	1
9	-0,13582	0,63173				-72,80395	0,1123	0,81377	0,11003	0,02695	1
10	-0,04104	0,51323	0,03522			-70,96658	0,11331	0,81042	0,10985	0,02762	2
11	0,27318	-0,103	0,41898	-0,07616		-69,0938	0,11439	0,8068	0,10971	0,02781	3
12	-3,0258	8,6132	-7,8922	3,3251	-0,5054	-67,93597	0,11468	0,8058	0,10879	0,02711	4
13	-1,4993	0,2002	1,1133			-31,1887	0,16866	0,72577	0,11031	0,015	2
14	-0,70231	1,17516				-32,71404	0,16769	0,72893	0,11026	0,0153	1
15	-0,199085	0,613877	0,001487			-71,01556	0,11325	0,81061	0,1098	0,02668	2
16	0,43276812	-0,0155478	0,46520852			54,4000		0,13400	0,23973	0,01008	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 7. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Handroanthus albus*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,070741	0,013019				-48,90048	0,14263	0,18872	0,13974	0,0515	1
2	1,850952	-0,058735	0,000663			-48,15776	0,14233	0,19204	0,138	0,05089	2
3	1,46	2,737	0,0163			-61,40511	0,12467	0,38009	0,12088	0,03977	2
4	2,729	0,122				-49,31449	0,14204	0,19541	0,13917	0,05119	1
5	-0,535743	0,015235	0,048648			-61,93591	0,12401	0,38664	0,12024	0,03885	2
6	6,898	0,1402	2,86			-60,14493	0,12626	0,36427	0,12241	0,04041	2
7	-6,9006	1,3239	0,5861			-14,30848	0,19967	0,38721	0,12048	0,01966	2
8	-6,6819	0,625				-16,12616	0,19794	0,39779	0,12094	0,01984	1
9	0,25886	0,22914				-62,94135	0,12394	0,38735	0,12144	0,04036	1
10	-0,13282	0,70068	-0,13264			-63,67883	0,12187	0,40765	0,11816	0,03659	2
11	0,9065	-1,2455	1,024	-0,2182		-63,30552	0,1212	0,41415	0,11625	0,03562	3
12	-7,1347	18,7879	-16,957	6,6887	-0,961	-67,71942	0,11493	0,47323	0,10903	0,03241	4
13	-1,3613	0,1518	0,5861			-14,30771	0,19967	0,3872	0,12048	0,01966	2
14	-0,77403	0,62504				-16,1253	0,19794	0,39778	0,12094	0,01984	1
15	0,145978	0,207576	0,002737			-61,40454	0,12467	0,38009	0,12088	0,03977	2
16	0,006255871	0,88536529	0,51002619			-52,91261		0,2953	0,13159	-0,0003	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e \ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 8. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Ocotea rubra*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,46698	0,02846				16,46402	0,2742	0,11785	0,26866	0,05522	1
2	-6,71062	0,239062	-0,001769			18,06881	0,27601	0,10617	0,2676	0,05433	2
3	-3,151	4,76	0,03608			-18,29845	0,19186	0,56811	0,18602	0,02812	2
4	3,832	0,2372				16,577	0,27451	0,11585	0,26897	0,05541	1
5	-2,919513	0,04717	0,135624			-18,1384	0,19217	0,56672	0,18631	0,02719	2
6	-8,841	0,3903	7,25			-17,25806	0,19387	0,55903	0,18796	0,02799	2
7	-11,7215	2,3405	1,0267			-30,28816	0,17018	0,53884	0,18681	0,01506	2
8	-10,981	1,0681				-31,78252	0,16925	0,54386	0,18741	0,01526	1
9	-0,0749	0,47542				-19,92085	0,19057	0,5739	0,18672	0,02833	1
10	-0,130233	0,516326	-0,007349			-17,92766	0,19257	0,56489	0,18671	0,02822	2
11	-2,1557	2,819	-0,8553	0,1013		-16,48287	0,19358	0,56035	0,18567	0,02768	3
12	-1,07699	1,15254	0,08564	-0,12917	0,02069	-14,49048	0,1957	0,55064	0,18566	0,02769	4
13	-2,0176	0,2872	1,0267			-30,28913	0,17018	0,53885	0,18681	0,01506	2
14	-0,8852	1,0681				-31,78332	0,16925	0,54386	0,18741	0,01526	1
15	-0,315145	0,45944	0,004761			-18,29891	0,19186	0,56811	0,18602	0,02812	2
16	0,00020946	2	0,89193611			-4,97619		0,4592	0,21252	0,00038	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 9. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Vochysia guianensis*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	GL
1	-0,403831	0,025662				60,43622	0,42564	0,24715	0,41704	0,13783	1
2	-1,8846776	0,0737571	-0,000381			61,93936	0,42801	0,23874	0,41497	0,12799	2
3	-2,275	1,512	0,01514			55,4275	0,40103	0,3317	0,38881	0,12524	2
4	4,06	0,1987				61,09115	0,42844	0,23723	0,41978	0,14482	1
5	-1,386806	0,031751	0,07332			53,16538	0,39206	0,36126	0,38011	0,12187	2
6	-4,644	0,2419	3,787			55,87926	0,40284	0,32563	0,39057	0,13294	2
7	-8,7657	1,9065	0,4823			38,15839	0,33742	0,41575	0,39234	0,0624	2
8	-7,3774	0,7266				42,34344	0,35519	0,35259	0,40595	0,07692	1
9	0,52361	0,27985				58,07382	0,4157	0,2819	0,4073	0,15276	1
10	-0,81731	1,29739	-0,17099			44,11838	0,35815	0,46698	0,34723	0,10524	2
11	0,2011	0,12673	0,2304	-0,04156		44,04181	0,35458	0,47755	0,3401	0,10778	3
12	1,26297	-1,58178	1,16731	-0,25086	0,0162	45,5961	0,3569	0,47068	0,33859	0,10714	4
13	-4,2067	0,9419	0,4823			38,15868	0,33742	0,41575	0,39235	0,0624	2
14	-0,5093	0,7266				42,34415	0,3552	0,35258	0,40595	0,07693	1
15	-0,227558	0,192814	0,015118			55,42782	0,40103	0,33169	0,38881	0,12524	2
16	0,001680841	1	0,41667644			57,5622		0,331	0,3972	-0,0028	2

Em que: 1 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln Vms = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $Vms = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $Vms = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; Raj^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = graus de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; Vms = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).

Apêndice 10. Resultado dos ajustes dos modelos testados considerando os dados das toras da espécie *Manilkara huberi*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	AIC	RSE	R ² aj	RMSE	Bias	df
1	-0,684259	0,028288				18,594165	0,28011	0,53054	0,27445	0,06732	1
2	-2,0870254	0,0741944	-0,0003633			19,285212	0,27939	0,53294	0,27088	0,06107	2
3	7,95	1,6	0,02814			-22,410997	0,18413	0,79713	0,17852	0,04382	2
4	1,974	0,219				20,60796	0,2858	0,51124	0,28003	0,07325	1
5	-1,823903	0,031669	0,106164			-10,638635	0,20713	0,74328	0,20082	0,04238	2
6	-3,06	0,2392	5,274			-5,067252	0,219	0,71302	0,21233	0,05007	2
7	-9,8639	1,975	0,8084			-10,516769	0,20739	0,72682	0,18323	0,02242	2
8	-9,92742	0,95599				-11,223149	0,20789	0,7255	0,17955	0,0235	1
9	0,0681	0,37217				-24,253389	0,18249	0,80073	0,1788	0,04491	1
10	0,0669695	0,3729804	-0,0001224			-22,253465	0,18442	0,79649	0,1788	0,04488	2
11	-0,5773	1,04982	-0,20712	0,01825		-22,563526	0,18216	0,80146	0,17472	0,04175	3
12	0,10919	0,03035	0,31401	-0,0897	0,00757	-20,892076	0,18357	0,79838	0,17415	0,04197	4
13	-2,2233	0,3583	0,8084			-10,517232	0,20739	0,72682	0,18323	0,02242	2
14	-0,89151	0,95598				-11,223932	0,20789	0,72551	0,17955	0,0235	1
15	0,007972	0,35833	0,0016			-22,410993	0,18413	0,79713	0,17852	0,04382	2
16	9,99048.10 ⁻⁵	1,7900	0,7748047			-18,71286		0,7904	0,18525	-0,0014	2

Em que: 1 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon$; 2 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$; 3 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \ell + \varepsilon$; 4 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \varepsilon$; 5 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 \ell + \varepsilon$; 6 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 \ell^2 + \varepsilon$; 7 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln \ell + \varepsilon$; 8 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln (d^2 \ell) + \varepsilon$; 9 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \varepsilon$; 10 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \varepsilon$; 11 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \varepsilon$; 12 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 Vt^2 + \beta_3 Vt^3 + \beta_4 Vt^4 + \varepsilon$; 13 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln Vt + \varepsilon$; 14 = $\ln V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 \ln Vt + \varepsilon$; 15 = $V_{ms} = \beta_0 + \beta_1 Vt + \beta_2 d + \varepsilon$; 16 = $V_{ms} = \beta_0 * d^{\beta_1} * \ell^{\beta_2} + \varepsilon$; $\hat{\beta}_i$ = estimativa dos parâmetros do modelo ($i = 1, \dots, 2$); AIC = Critério de Informação de Akaike; RSE = viés do modelo; R_{aj}^2 = Coeficiente de determinação ajustado; RMSE = raiz quadrada do erro médio; GL = grau de liberdade; β_i = parâmetros a serem estimados; d = diâmetro médio da tora; ℓ = comprimento da tora em metros; V_{ms} = volume com casca da tora em metros cúbicos; ε = erro aleatório; e Ln = logaritmo na base neperiana ($e = 2,7128$).