

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL

RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA DE ÁRVORES MADEIREIRAS:
SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL

ANTONIO REATEQUIM FILHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RIO BRANCO-AC, BRASIL
FEVEREIRO DE 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL

RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA DE ÁRVORES MADEIREIRAS:
SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL

ANTONIO REATEQUIM FILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augusto da Cunha

RIO BRANCO-AC, BRASIL
FEVEIREIRO DE 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA FLORESTAL - PPGCIFLOR



**ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE ANTONIO REATEQUIM FILHO,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO, STRICTO SENSU, EM CIÊNCIA
FLORESTAL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE.**

Às dez horas por do dia vinte e oito de fevereiro de 2025, realizou-se, de forma presencial, a Sessão Pública de Defesa de Dissertação, intitulada: **"RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA DE ÁRVORES MADEIREIRAS: SUBSÍDIO PARA O MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL"**, de autoria do mestrando Antonio Reatequim Filho, discente do Programa de Pós - graduação em Ciência Florestal, da Universidade Federal do Acre - UFAC, em nível de Mestrado. Na ocasião, a Banca Examinadora esteve constituída pelos membros: **Prof. Dr. Thiago Augusto da Cunha (Presidente – orientador – CCBN - UFAC); Prof. Dr. Tarcísio José Gualberto Fernandes (CCBN -UFAC); Prof. Dr. Hudson Franklin Pessoa Veras (Membro Externo - IFAC)**. Logo após a exposição oral, houve arguição pelos Examinadores e, ao final da arguição, reaberta a sessão pública, o discente foi considerado **APROVADO** pela Banca Examinadora. E, ao término, foi lavrada a presente Ata, que será assinada pelos avaliadores.

Documento assinado digitalmente
gov.br THIAGO AUGUSTO DA CUNHA
Data: 11/06/2025 11:31:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Augusto da Cunha
(Presidente – orientador - CCBN - UFAC)

Documento assinado digitalmente
gov.br TARCISIO JOSE GUALBERTO FERNANDES
Data: 11/06/2025 11:45:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tarcísio José Gualberto Fernandes
(Membro Interno - CCBN - UFAC)

Documento assinado digitalmente
gov.br HUDSON FRANKLIN PESSOA VERAS
Data: 13/06/2025 16:43:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Hudson Franklin Pessoa Veras
(Membro Externo - IFAC)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

R288r Reatequim Filho, Antonio, 1985 -
Relação hipsométrica de árvores madeiras: subsídio para o
manejo florestal sustentável / Antonio Reatequim Filho; orientador:
Prof. Dr. Thiago Augusto da Cunha. – 2025.
55 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre,
Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. Rio Branco,
2025.

Inclui referências bibliográficas.

1. Manejo florestal. 2. Produtos florestais. 3. Florestal tropical.
I. Cunha, Thiago Augusto da (orientador). II. Título.

CDD: 634

“Melhor é o fim das coisas do que o princípio delas.”

Eclesiastes 7:8

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por até aqui ter me sustentado.

Aos meus pais, Antonio Reatequim e Maria de Moura, por todo o amor e educação que me deram. Expresso também minha gratidão aos meus irmãos André Luiz de Moura Reatequim, Arleudo de Moura Reatequim, Adailton de Moura Reatequim, Acleudia de Moura Reatequim.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Augusto da Cunha, aos meus amigos e colegas de mestrado, Moisés Parreiras Pereira, Ítalo Felipe Nogueira Ribeiro, Erica Kerolaine Mendonça dos Santos, Jaqueline Lins Januário e Waldemar Matos, e também aos meus parceiros de trabalho Adenilson de Sousa Viana e Célio Roberto Oliveira da Silva, pela amizade e parceria. Agradeço ao PPG CIFLOR e a CAPES pelo apoio e concessão da bolsa.

SUMÁRIO

ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Manejo Florestal sustentável na Amazônia	13
3.1.1 Fases das operações para o manejo florestal	14
3.1.2 Fase exploratória	15
3.1.3 Fase pós-exploratória	16
3.2 Importância da medição da altura comercial para o manejo florestal	17
3.3 Métodos tradicionais para a medição da altura das árvores	17
3.3 Tecnologias para a medição da altura das arvores	18
3.4 Estimativa da altura das árvores no manejo florestal	19
3.4.1 Relação hipsométrica e sua aplicação em inventários florestais	20
3.5 Modelagem da relação altura-diâmetro	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 Área de estudo	23
4.2 Espécies estudadas e variáveis consideradas.....	25
Etapa 1: Avaliação do efeito da localidade.....	27
Etapa 2: Modelagem com assíntotas aleatórias por espécie.....	29
4.4 Validação e análise da precisão do modelo	30
5 DISCUSSÃO.....	43
6 CONCLUSÃO.....	46
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

RESUMO

Esta dissertação teve como objetivo ajustar e validar modelos hipsométricos para estimar a altura do fuste de espécies madeireiras em florestas tropicais da Amazônia Ocidental, utilizando o modelo de Mitscherlich modificado. Foram analisados dados de 68.633 árvores de seis espécies comerciais obtidas em três áreas de manejo florestal: duas situadas em FLONAs de Rondônia e uma sob gestão privada no Amazonas. A relação altura-diâmetro foi modelada incorporando efeitos aleatórios por espécie e efeitos fixos por localidade, com base em modelos não lineares mistos. A validação foi feita com dados independentes e a precisão dos modelos avaliada por meio de critérios como log-verossimilhança, AICc e variância residual. Os resultados indicaram que o modelo apresentou bom ajuste ($R^2 > 0,95$) para a maioria das espécies, sendo que o efeito da localidade foi significativo para cinco delas. Conclui-se que o modelo de Mitscherlich modificado é eficaz para estimar a altura do fuste, oferecendo subsídios robustos para o planejamento do manejo florestal sustentável na região.

Palavras-chave: Relação altura-diâmetro, modelo não-linear, floresta tropical, validação estatística.

ABSTRACT

This dissertation investigated the development and evaluation of hypsometric models to estimate tree height based on diameter at breast height (D) in Amazonian tropical forests, with the aim of contributing to sustainable forest management through an efficient and economically viable method. The study used data from 136,685 trees of 16 timber species to fit statistical models, including linear and nonlinear regressions, and logarithmic transformations. The results indicated that the models with logarithmic transformations presented the best performance, reaching coefficients of determination (R^2) higher than 0.96. In contrast, simple linear models demonstrated poor performance, with R^2 lower than 0.10. The application of these models allowed estimating tree height based on DBH, which contributes to time savings in the execution of forest inventories, especially in remote areas. In addition, the adjusted models demonstrated robustness and good accuracy, capable of contributing to the estimated forest volume. This contribution impacts the planning and implementation of sustainable management practices, favoring the rational and low-impact exploitation of forest resources. The study also highlighted the relevance of hypsometric equations in estimating dendrometric variables and the practical applicability of these models to improve the efficiency of forest management in the Amazon. To increase the effectiveness of the models, calibration for different sites and species was recommended, as well as the integration of geotechnologies, such as remote sensing. This work reinforces the importance of science in forest management and in the development of bioeconomy strategies.

Keywords: Statistical Modeling, Forest Inventory, Dendrometric Estimation

1 INTRODUÇÃO

O manejo florestal sustentável é uma atividade relevante para o desenvolvimento socioeconômico na Amazônia, visto que promove a exploração racional de recursos florestais, como a madeira, gerando empregos e renda para a sociedade local, além de contribuir para a regeneração e conservação das florestas de forma sustentável (Rostonen *et al.*, 2008; Garrett *et al.*, 2021).

O sucesso desse modelo de manejo é influenciado por diversos fatores, dentre os quais, o volume de madeira estocado na floresta, que é uma variável crítica, pois impacta diretamente o planejamento florestal (De Petris; Sarvia; Borgogno-Mondino, 2022). Nesse contexto, a qualidade do levantamento das árvores dentro das Unidades de Produção Anual (UPAs) é um fator determinante.

Uma das etapas mais relevantes do manejo florestal sustentável é a execução do inventário florestal 100%, onde realiza-se a medição de variáveis dendrométricas e de sítio para nortear o microzoneamento da área, dentre as variáveis mensuradas estão o diâmetro à altura do peito (D) e o comprimento do fuste (hf), as quais são essenciais para o cálculo do volume comercial (vm) e a parametrização de modelos de produção e crescimento florestal (Almeida *et al.*, 2022).

Contudo, a medição da altura é fator sensível no inventário florestal 100% devido a dificuldades operacionais, como a visualização limitada do fuste em florestas de dossel fechado (Larjavaara; Muller-Landau, 2013), o alto custo e o tempo elevado para a medição direta dessa variável (Vargas-Larreta, 2009). Em florestas situadas no estado do Acre, essa situação é agravada pela presença dominante de espécies como o bambu (*Guadua sp.*), que tornam as medições mais árduas (Ferreira, 2014).

Neste sentido, estratégias simplificadas são comumente consideradas para a medição da altura de árvores em florestas locais, tais como o uso de varas de medição ou estimativas visuais feitas pela equipe de campo, porém tais métodos apresentam limitações que introduzem vieses no cálculo do volume comercial individual das árvores, impactando diretamente na precisão do estoque de madeira estimado, evidenciando a necessidade de novas ferramentas e abordagens para otimizar essa etapa essencial do manejo florestal no sudoeste da Amazônia (Baia, 2018).

Dentre as possíveis soluções, o uso de modelos hipsométricos pode ser uma alternativa promissora, sendo que dentre os modelos utilizados encontra-se a relação altura/diâmetro, amplamente conhecida como relação hipsométrica, que fornece

informações para o manejo florestal, viabilizando estimativas precisas da altura e do volume comercial das árvores, mesmo quando a altura não é diretamente medida (Assmann, 1970; Durlo; Denardi, 1998).

Essa relação é comumente empregada em simuladores de crescimento e produção florestal, bem como em estudos sobre a produtividade do sítio e a biomassa florestal (Burkhart; Strub, 1974; Chave *et al.*, 2005), porém, apesar da ampla aplicabilidade dos modelos hipsométricos, grande parte dos estudos existentes focam em povoamentos florestais homogêneos, sendo escassas as pesquisas realizadas em florestas naturais, como as encontradas na Amazônia (Leão *et al.*, 2021).

O uso de modelos hipsométricos, como a relação altura/diâmetro, melhora significativamente a precisão das estimativas de volume, reduzindo erros na estimativa de biomassa e estoque de madeira. Entretanto, Chave *et al.* (2005) relatam que a relação altura-diâmetro é influenciada por diversos fatores ambientais e de competição intraespecífica, o que realça a necessidade de ajustes locais desses modelos, sendo também necessário verificar a precisão dos dados por meio de modelos estatísticos, afim de assegurar a precisão dos dados (De Petris; Sarvia; Borgogno-Mondino (2022).

Nesse cenário, compreender e desenvolver modelos hipsométricos para árvores comerciais no contexto do Manejo Florestal Sustentável na Amazônia é de fundamental importância. Por ser uma área com elevada biodiversidade, a floresta amazônica requer modelos de regressão separados para cada espécie ou grupo de espécies, visto que a variabilidade das árvores pode comprometer a precisão das estimativas de altura do fuste.

Sendo assim, esse trabalho tem por objetivo ajustar e verificar o desempenho de modelos de relação altura-diâmetro para estimar com precisão e acurácia a altura e o volume do fuste de espécies florestais madeireiras em três áreas situadas na Amazônia Ocidental, comparando o desempenho de cada modelo e indicando quais possuem potencial para serem utilizados em projetos de manejo na região.

Modelos de altura-diâmetro são fundamentais para estimar o volume de madeira, biomassa e dinâmica de crescimento florestal sem a necessidade de medições diretas da altura das árvores, que são custosas e difíceis de obter.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver, ajustar e validar o modelo hipsométrico de Mitscherlich modificado para estimar com precisão o comprimento do fuste de árvores comerciais em áreas de manejo florestal na Amazônia Ocidental, considerando variações interespécies e efeitos da localidade.

2.2 Objetivos específicos

1. Analisar a influência da localidade (Rondônia e Amazonas) sobre a relação altura-diâmetro nas espécies estudadas, com base em modelos não lineares mistos;
2. Ajustar os parâmetros do modelo de Mitscherlich modificado, incorporando assíntotas específicas por espécie e por localidade quando necessário;
3. Avaliar a acurácia e robustez preditiva do modelo por meio de validação cruzada com dados independentes, visando sua aplicação em inventários florestais 100%;
4. Subsidiar o planejamento técnico-operacional do manejo florestal sustentável, indicando a aplicabilidade dos modelos calibrados para diferentes contextos edafoclimáticos e regimes de manejo.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Manejo Florestal sustentável na Amazônia

A gestão sustentável de florestas visa promover o uso racional dos recursos florestais, assegurando a regeneração natural das florestas e garantindo a produção contínua de bens madeireiros e não madeireiros de maneira sustentável (Cunningham *et al.*, 2015), na Amazônia, por exemplo, a implementação de planos de manejo florestal é crucial para minimizar impactos ambientais oriundos da exploração madeireira, evitando a extração intensiva e resguardando a capacidade produtiva da floresta ao longo do tempo (Richardson; Peres, 2016).

Nesse contexto, a utilização de modelos hipsométricos surge como um instrumento importante para otimizar os processos de medição de altura comercial e planejamento no manejo florestal, tais modelos permitem estimar a altura das árvores a partir do diâmetro à 1,30 m acima do solo (D) sem a necessidade de medições diretas, o que proporciona ganho de tempo na execução de inventários florestais, e pode contribuir para melhor precisão das estimativas volumétricas, resultando em dados mais assertivos para o planejamento das atividades de exploração florestal (Leite, 2017).

Para assegurar a sustentabilidade do manejo florestal na Amazônia é necessário promover a adoção de práticas que mitiguem os impactos ambientais, favorecendo a regeneração natural e a preservação dos serviços ecossistêmicos, destaca-se que o Brasil, um dos maiores produtores mundiais de madeira tropical, tem na Amazônia sua principal fonte desse recurso, o que realça a necessidade de regulamentação e controle sobre a exploração madeireira (ITTO, 2017).

Para assegurar que práticas sustentáveis sejam, de fato, implementadas em áreas de manejo foram estabelecidas normas e diretrizes técnicas, como a Norma de Execução do IBAMA n.º 1/2007 (IBAMA, 2007) e a Resolução CONAMA 406/2009 (BRASIL, 2009), que regulamentam a exploração florestal e estabelecem critérios para reduzir os impactos ambientais.

Quando aplicadas adequadamente, tais normas asseguram a perpetuação da floresta e promovem benefícios socioeconômicos, fomentando empregos, fortalecendo a economia local e incentivando a participação das comunidades no uso sustentável dos recursos naturais (Pereira *et al.*, 2010; Ângelo *et al.*, 2014).

É essencial que na exploração de uma área ocorra a elaboração do plano de manejo florestal, um documento que irá descrever características do local em questão, bem como, detalhar como será feita a exploração da floresta, de modo a permitir a regeneração natural da mesma, principalmente o fornecimento de informações prévias referentes as árvores inventariadas do manejo (Leite, 2017).

O Brasil está entre os maiores produtores de madeira nativa com uma produção maior concentrada nos estados amazônicos (ITTO, 2017), sendo que estima-se que a Amazônia brasileira possua cerca de 3,1 e 5,8 bilhões de m³ de madeira comercial, com isso a demanda de exportação dessa madeira tende a aumentar (Richardson; Peres, 2016).

Destaca-se que ainda há a necessidade de que ocorra a formalização e legalização de empreendimentos madeireiros na Amazônia, fazendo com que estes passem a seguir técnicas e normas do manejo sustentável (Pereira *et al.*, 2010; Ângelo *et al.*, 2014), sendo que o uso dos recursos naturais de forma precisa e menos impactante ao meio ambiente, resultará em benefícios socioeconômicos e ambientais, reduzindo o risco do esgotamento dos recursos florestais essenciais (Brasil, 1995).

3.1.1 Fases das operações para o manejo florestal

O manejo florestal é dividido em fases, a primeira delas, conhecida como fase pré-exploratória, que ocorre um ano antes da exploração, durante essa fase as unidades de trabalho ou unidades de produção anual (UPA) para exploração são selecionadas, a abertura das trilhas é realizada, permitindo a equipe de campo realize o censo da área, coletando sistematicamente todas as informações botânicas e topográficas relevantes (Zweede *et al.*, 2002).

Durante o inventário, ocorre uma avaliação abrangente de todos os indivíduos arbóreos com potencial comercial e com diâmetro igual ou superior ao estabelecido, geralmente acima de 30 cm, sendo essas árvores identificadas, marcadas e mapeadas (Floriano, 2021). Nessa etapa também é realizado um levantamento das condições do relevo e da localização dos cursos d'água, possibilitando o planejamento da implantação da infraestrutura de estradas, viabilizando as operações de colheita e transporte da produção (Acosta *et al.*, 2023).

Com relação ao inventário florestal, um dos métodos mais utilizados é o inventário contínuo, que envolve a adoção de parcelas permanentes de estudo na área de

produção, permitindo o monitoramento contínuo da floresta, seu estado e comportamento (Instituto de Florestas do Paraná, 2016).

Para a realização do monitoramento florestal, recomenda-se 1 ha para cada 100 ha em um talhão, sendo esse processo necessário para indicar as intervenções silviculturais mais adequadas a serem implementadas, visando de garantir e aprimorar a reprodução e o desenvolvimento da floresta manejada (Embrapa, 1984).

As intervenções silviculturais são realizadas somente nos casos em que as metas econômicas do Plano de Manejo estão ameaçadas ou quando são notados impactos ecológicos que demandam uma intervenção para garantir a recuperação da área impactada, essas práticas estimulam o crescimento das árvores remanescentes, entretanto, essas operações silviculturais tendem a ser limitadas para que a composição natural das espécies da área manejada não seja drasticamente alterada (Souza *et al.*, 2015).

Um dos tratamentos silviculturais mais relevantes é a remoção de cipós, uma operação que minimiza impactos durante a exploração, visto que reduz a probabilidade de que a árvore abatida arraste indivíduos que estejam interligados com ela através do cipó no momento de sua queda, além disso reduz riscos de acidentes aos trabalhadores (Embrapa, 2011).

Ainda na fase pré-exploratória, ocorre a criação dos mapas, que é a base para todas as atividades do manejo, permitindo a otimização da exploração e o planejamento da logística e infraestrutura, como a instalação de pátios e estradas secundárias que interligam as estradas primárias, aumentando a eficácia do manejo (Ministério do Meio Ambiente, 2006; Ministério do Meio Ambiente, 2023).

No planejamento da logística e do mapa da área de manejo, as estradas são fatores fundamentais, salienta-se que há diferentes tipos de estradas em uma área de exploração (Vidal *et al.*, 1997), as estradas permanentes, por exemplo, são mais largas e recebem um acabamento de piçarra que permite o tráfego durante todo o ano, já estradas secundárias possuem largura menor e acabamento mais simples, sendo tráfego possível apenas durante o período mais seco do ano (Mata Nativa, 2019).

3.1.2 Fase exploratória

No manejo florestal, após a etapa pré-exploratória, ocorre a fase exploratória, que consiste na execução das operações de exploração da floresta, durante essa fase, diversas atividades são realizadas com o objetivo de maximizar a eficiência operacional,

minimizar os impactos ambientais e garantir a segurança dos trabalhadores envolvidos no processo (Embrapa, 2011).

Um dos principais aspectos da fase exploratória é a execução do planejamento logístico para a colheita da madeira, onde ocorre a abertura de trilhas, a localização e marcação das árvores a serem exploradas, bem como a identificação dos recursos hídricos e outros elementos da paisagem que possam impactar na logística e na minimização dos impactos ambientais (Zweede; Pereira; Barreto, 2002).

Ademais, a etapa de exploração é influenciada pela qualidade dos mapas topográficos e cartográficos que foram gerados na fase pré-exploratória, pois tais mapas possibilitam encontrar a posição das árvores de interesse comercial e os locais onde serão abertos estradas e pátios de estocagem (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

A fase exploratória, portanto, busca estabelecer um equilíbrio entre a produtividade da exploração florestal e a conservação ambiental, garantindo que as operações sigam as diretrizes do manejo florestal sustentável e promovam uma exploração racional dos recursos naturais (Mata Nativa, 2019).

3.1.3 Fase pós-exploratória

Após a execução da exploração, ocorre a etapa pós-exploratória, nessa fase é feita a avaliação dos danos ambientais e ecológicos, para isso, são conduzidos levantamentos para avaliar regeneração natural, a sobrevivência das árvores remanescentes e a estrutura da vegetação após a exploração madeireira, visando analisar se será mantida a capacidade produtiva da floresta no decorrer dos anos (Zweede; Pereira; Barreto, 2002).

As técnicas silviculturais são importantes nessa fase e incluem a eliminação de indivíduos competidores, por meio do anelamento de árvores indesejáveis, favorecendo o crescimento das espécies de interesse comercial, ademais, a remoção de cipós também é realizado para favorecer o crescimento das árvores de interesse econômico (Embrapa, 1984).

Um fator importante da fase pós-exploratória é a manutenção da infraestrutura de manejo, incluindo a verificação das estradas e dos pátios de estocagem, visto que a degradação presença de estradas precárias pode acarretar na erosão do solo e ambiental, tornando essencial a adoção de práticas para reduzir esses impactos (Ministério do Meio Ambiente, 2023).

Além disso, poder ser necessário revisar o Plano de Manejo Florestal, realizando ajustes com base nos dados coletados durante a exploração e o monitoramento pós-colheita, visando resguarda futuras explorações sejam mais eficientes, causando menor impacto ambiental, assegurando a sustentabilidade da exploração florestal (Instituto de Florestas do Paraná, 2016).

3.2 Importância da medição da altura comercial para o manejo florestal

A medição da altura comercial das árvores é uma etapa fundamental no manejo florestal sustentável, pois influencia diretamente o cálculo do volume de madeira e, consequentemente, o planejamento das atividades de exploração (Almeida et al., 2022). A altura do fuste (h_f) é uma variável dendrométrica essencial para estimar o volume comercial (v_m) e parametrizar modelos de crescimento e produção florestal, sendo crítica para a tomada de decisões no manejo (Durlo & Denardi, 1998).

A precisão na medição da altura é crucial para evitar erros na estimativa de estoques madeireiros, que podem levar tanto à subutilização dos recursos florestais quanto à superexploração, comprometendo a sustentabilidade do manejo (De Petris, Sarvia, & Borgogno-Mondino, 2022). Além disso, a altura comercial é utilizada no microzoneamento da área, auxiliando na definição de estratégias de colheita que minimizem impactos ambientais (Ros-Tonen et al., 2008).

No entanto, a medição direta da altura em florestas tropicais densas, como as da Amazônia, apresenta desafios operacionais, como a dificuldade de visualização do topo das árvores devido ao dossel fechado (Larjavaara & Muller-Landau, 2013) e a presença de bambuzais (*Guadua* sp.), que dificultam o acesso e a medição (Ferreira, 2014). Essas limitações reforçam a necessidade de métodos alternativos, como modelos hipsométricos, para garantir estimativas confiáveis (Baia, 2018).

3.3 Métodos tradicionais para a medição da altura das árvores

A mensuração da altura de indivíduos arbóreos é uma tarefa árdua no manejo florestal, especialmente em florestas tropicais como a Amazônia (Ferreira, 2014), ressalta-se que dentre os métodos adotados, o hipsômetro se destaca como um instrumento eficaz para estimar a altura das árvores de forma não invasiva e precisa (Leão et al., 2021), além disso, métodos indiretos, como o teorema de Pitágoras e instrumentos

como o Vertex, também são utilizados, possibilitando medições mais rápidas e seguras (De Petris; Sarvia; Borgogno-Mondino, 2022).

Há na literatura estudos que enfatizam a importância de realizar a calibração de instrumentos hipsométricos para condições ambientais específicas, como em áreas de transição Cerrado-Amazônia, local onde a visibilidade do dossel é limitada pela presença de bambu (Curto *et al.*, 2019), realizar esse procedimento eleva a precisão das volumétricas e minimiza os riscos de sub ou superestimações (Loetsch *et al.*, 1973).

A medição da altura total das árvores é uma parte crucial da dendrometria, destaca-se que existem várias técnicas e instrumentos utilizados para essa finalidade, incluindo medidas diretas e indiretas (Almeida *et al.*, 2022). As medidas diretas são realizadas diretamente sobre a árvore, ao alcance do mensurador, já as medidas indiretas dependem do uso de métodos ópticos e/ou de instrumentos específicos para determinar a grandeza a ser mensurada (Figueiredo; Braz; D'Oliveira, 2007).

É importante ressaltar que a precisão da medição da altura arbórea pode ser afetada por vários fatores, incluindo as condições ambientais, a precisão do equipamento e a representatividade das amostras em relação à área total da floresta (Almeida, *et al.*, 2022).

3.3 Tecnologias para a medição da altura das arvores

A medição precisa da altura das árvores é fundamental para o manejo florestal sustentável, e diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para essa finalidade, variando desde métodos tradicionais até técnicas avançadas de sensoriamento remoto e geotecnologias (Hyypä *et al.*, 2020).

Entre as técnicas convencionais mais utilizadas em inventários florestais, destacam-se:

Hipsômetros ópticos e ultrassônicos: Instrumentos como o Vertex Hypsometer e clinômetros baseiam-se em princípios trigonométricos para estimar a altura a partir da medição de ângulos e distâncias (Vargas-Larreta, 2009). Embora sejam amplamente utilizados, sua eficácia é limitada em florestas densas devido à obstrução visual do dossel (Larjavaara & Muller-Landau, 2013).

Varas de medição e escalada: Em árvores de menor porte, varas extensíveis ou mesmo a escalada direta podem ser empregadas, porém esses métodos são inviáveis em larga escala devido a restrições de tempo e riscos operacionais (Baia, 2018).

Com os avanços tecnológicos, métodos mais sofisticados têm sido incorporados ao manejo florestal, proporcionando maior precisão e eficiência:

LiDAR (Light Detection and Ranging): Essa tecnologia utiliza pulsos laser para gerar modelos tridimensionais da floresta, permitindo a medição precisa de alturas e a caracterização da estrutura vertical da vegetação (Hyypä et al., 2020). O LiDAR pode ser aerotransportado (airborne LiDAR) ou terrestre (terrestrial LiDAR), sendo especialmente útil em florestas complexas como as da Amazônia (Duncanson et al., 2022). No entanto, seu alto custo ainda limita sua aplicação em larga escala na região (Garrett et al., 2021).

Fotogrametria digital com drones: Veículos aéreos não tripulados (VANTs) equipados com câmeras de alta resolução permitem a reconstrução 3D da floresta por meio de técnicas de estrutura a partir do movimento (Structure from Motion - SfM) (Almeida et al., 2022). Essa abordagem tem se mostrado uma alternativa eficiente e de custo acessível para estimar a altura de árvores em áreas de difícil acesso (Puliti et al., 2020).

Sensoriamento remoto orbital: Imagens de satélites de alta resolução, como as do programa GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), têm sido utilizadas para estimar a altura da vegetação em escalas regionais e globais (Dubayah et al., 2020). Esses dados são valiosos para complementar inventários de campo e validar modelos hipsométricos (Saatchi et al., 2021).

Apesar dos avanços, muitas operações de manejo na Amazônia ainda dependem de métodos simplificados, como estimativas visuais, que podem introduzir erros significativos (Ferreira, 2014). A integração de tecnologias como LiDAR e drones com modelos estatísticos robustos (e.g., regressões alométricas e machine learning) tem potencial para melhorar a acurácia das estimativas (Burkhart & Strub, 1974; Leitold et al., 2021). Além disso, o desenvolvimento de plataformas de baixo custo e o processamento automatizado de dados são tendências promissoras para ampliar o uso dessas tecnologias no manejo florestal tropical (White et al., 2023).

3.4 Estimativa da altura das árvores no manejo florestal

A estimativa da altura das árvores no manejo florestal pode ser realizada por meio de métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos incluem o uso de instrumentos como hipsômetros e varas de medição, enquanto os indiretos envolvem modelos matemáticos baseados na relação entre diâmetro e altura (Vargas-Larreta, 2009).

Em florestas naturais heterogêneas, como as da Amazônia, a medição direta da altura é frequentemente inviável devido a limitações logísticas e custos elevados (Chave

et al., 2005). Nesse contexto, os modelos hipsométricos surgem como uma alternativa eficiente, permitindo estimar a altura a partir do diâmetro à altura do peito (DAP), uma variável de mais fácil obtenção (Assmann, 1970).

A relação hipsométrica é amplamente utilizada em inventários florestais, pois reduz o tempo e os custos das medições em campo, além de melhorar a precisão das estimativas volumétricas (Leite, 2017). No entanto, a aplicação desses modelos em florestas tropicais requer ajustes locais, considerando a variabilidade ambiental e a competição entre espécies (Leão et al., 2021).

3.4.1 Relação hipsométrica e sua aplicação em inventários florestais

Com relação aos métodos indiretos para obter a altura das árvores, um dos métodos é o uso de relações, como a relação hipsométrica, que descreve a relação entre a altura e o diâmetro (D) da árvore, permitindo estimar a altura de árvores de forma indireta com base em medições diamétricas (Vargas-Larreta, 2009). Esse modelo é comumente utilizado em florestas tropicais, onde a medição direta da altura é limitada pelo dossel fechado e pela alta diversidade específica (Mensah *et al.*, 2017).

Os modelos hipsométricos podem ser adaptados às características ecológicas e climáticas de cada região, sendo utilizados em florestas naturais e áreas plantadas, curiosamente, a utilização desse método na região amazônica ainda é limitada, mas estudos indicam que a calibração local desses modelos pode melhorar a precisão das estimativas de volume, contribuindo para o sucesso dos planos de manejo florestal.

A estrutura diamétrica de uma floresta, sob o ponto de vista da produção, possibilita conhecer o estoque de madeira disponível anteriormente a uma exploração e fornecer informações que auxiliem na tomada de decisões sobre a necessidade de reposição florestal, além de descrever importantes características de um povoamento e probabilidades de projeção através do tempo (Scolforo *et al.*, 1998; Pulz *et al.*, 1999).

O diâmetro é utilizado como uma variável independente em várias funções estimadas, tais como na relação hipsométrica, na distribuição diamétrica e na estimativa do diâmetro de copa, por si só, essa variável define padrões de uso da árvore (Machado; Figueiredo Filho, 2006).

Os modelos hipsométricos estabelecem a relação entre o diâmetro à 1,30 m sobre o solo (D) e a altura total das árvores sendo amplamente utilizados na estimativa volumétrica arbórea, especialmente em áreas de difícil acesso, como as florestas tropicais

da Amazônia, sendo fundamentais para o planejamento de planos de manejo florestal sustentável (Campos; Leite, 2017).

Diversos modelos lineares e não lineares amplamente empregados para descrever a relação altura-diâmetro foram submetidos a testes, em razão da escassa densidade de árvores registradas por espécie e da ausência de gradientes ecológicos evidentes no conjunto de dados, os modelos foram ajustados desconsiderando a variabilidade entre as espécies (Mensah *et al.*, 2017) (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos hipsométricos utilizados para descrever a relação entre altura total e diâmetro das árvores em floresta de várzea e terra firme no Amapá. Fonte: Baia (2018).

Modelos	Equações	Fonte e Autor
1. Log-log	$H = \exp(a + b \times \ln(D) + \varepsilon_i)$	Feldpausch et al. (2011)
2. Weibull	$H = H_{max} \times (1 - \exp(-a \times D^b)) + \varepsilon_i$	Feldpausch et al. (2011)
3. Ln	$H = a + b * \ln(D) + \varepsilon_i$	Feldpausch et al. (2011)
4. Rectangular - Hyperbolic	$H = (H_{max} \times D)/(a + D) - b + \varepsilon_i$	Feldpausch et al. (2011)
5. Power function	$H = a \times D^2 + \varepsilon_i$	Feldpausch et al. (2012)

a e b são os parâmetros a serem estimados; D é diâmetro à altura do peito medido a 1,30 m do nível do solo em centímetros (cm); H_{max} é a altura total assintótica máxima da amostra em metros (m); H é a altura total de cada árvore em metros; ε é erro aleatório; e $\ln$ é o logaritmo na base neperiana (2,7128).

Destaca-se que as equações hipsométricas podem ser caracterizadas pela relação de regressão entre altura e diâmetro, sendo empregadas para estimar as alturas das demais árvores da parcela com base nos diâmetros medidos, essa relação é expressa por meio de modelos de regressão, que podem ser lineares ou não lineares, sendo assim, a variável de difícil obtenção é estimada em função da variável mais rápida e acessível, resultando na redução do tempo, erros e custos associados às medições (Feliciano *et al.*, 2016; Sanquetta *et al.*, 2014).

3.5 Modelagem da relação altura-diâmetro

A relação hipsométrica é uma ferramenta fundamental em estudos florestais, pois descreve a associação entre a altura das árvores e seus diâmetros à altura do peito (D), permitindo estimar a altura de árvores não medidas a partir de dados dendrométricos conhecidos (CAMPOS; LEITE, 2017). Essa modelagem é essencial para a determinação do volume de madeira, da biomassa e do carbono estocado em povoamentos florestais,

sendo amplamente utilizada no manejo sustentável de florestas naturais e plantadas (SCOLFORO et al., 2019).

Diversos modelos matemáticos têm sido aplicados para descrever a relação hipsométrica, sendo os mais comuns os lineares e não lineares, como os propostos por Curtis (1967) e Näslund (1936). Segundo Huang et al. (2000), a escolha do modelo deve considerar características como ajuste, precisão e simplicidade, garantindo que as estimativas sejam biologicamente plausíveis. Entre os modelos mais utilizados, destacam-se os de forma logarítmica e os polinomiais, que apresentam boa aderência a diferentes espécies e condições de sítio (BINOTI et al., 2013).

A qualidade do ajuste da relação hipsométrica pode ser avaliada por meio de estatísticas como o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão da estimativa (Syx) e critérios de informação, como o Akaike (AIC) e o Bayesiano (BIC) (SCHNEIDER et al., 2017). Além disso, a validação dos modelos deve ser realizada com dados independentes, evitando superajustes que comprometam a generalização das equações (VANCLAY, 1994). Em muitos casos, a inclusão de variáveis ambientais, como índice de sítio e densidade do povoamento, pode melhorar a precisão das estimativas (MEHTÄTALO et al., 2015).

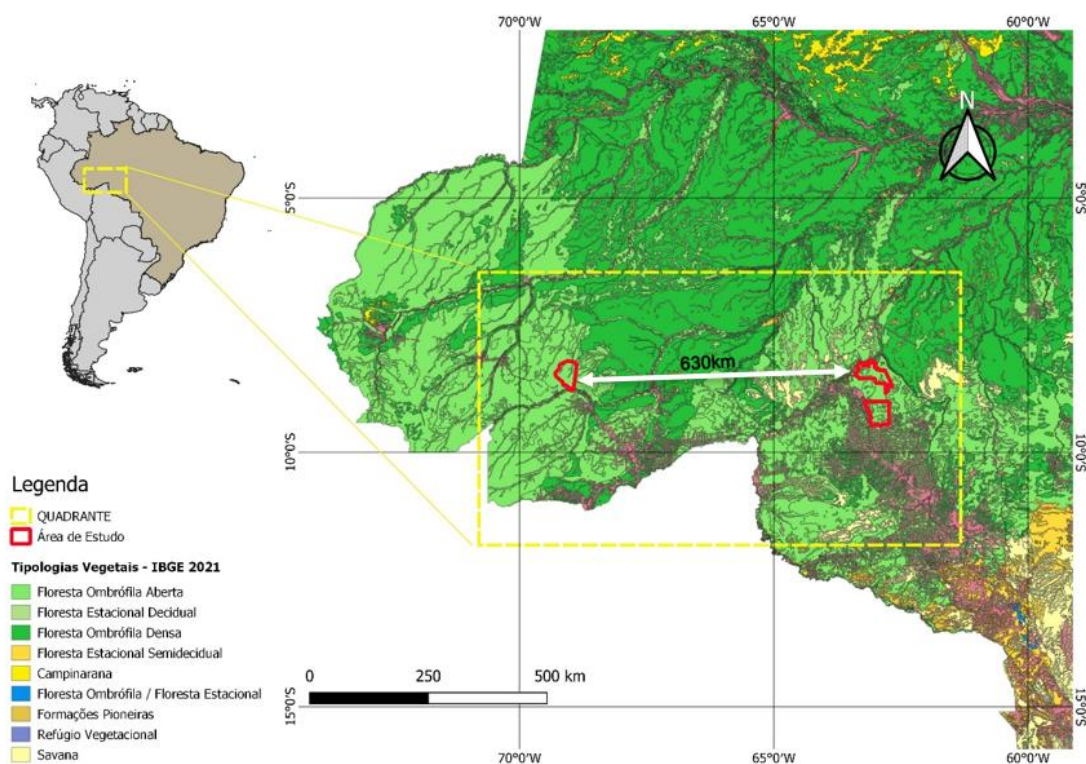
Em resumo, a modelagem da relação hipsométrica é uma etapa crucial no planejamento florestal, fornecendo subsídios para o manejo adequado dos recursos florestais. A seleção criteriosa dos modelos, aliada à validação estatística robusta, garante a confiabilidade das predições, contribuindo para o desenvolvimento de práticas silviculturais mais eficientes e sustentáveis.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo definido nessa pesquisa abrange 3 áreas de manejo florestal na Amazonia, sendo duas FLONAS no estado de Rondônia (Figura 1) e 1 área de manejo no Amazonas pela empresa com Sede no município de Manoel Urbano no estado do Acre (Figura 2).

Figura 1. Mapa de localização da UMF - FLONA Jacundá e FLONA Jamari, ambas situadas em Rondônia.



A Floresta Nacional (FLONA) do Jacundá e a FLONA do Jamari são duas importantes unidades de conservação de uso sustentável localizadas no estado de Rondônia, na Amazônia brasileira. Ambas foram criadas com o objetivo de conciliar a conservação da biodiversidade com o manejo florestal sustentável, permitindo a exploração controlada dos recursos naturais, ao mesmo tempo em que promovem a proteção do ecossistema florestal.

A FLONA do Jacundá foi criada por meio do Decreto de 01 de dezembro de 2004, possuindo uma área de aproximadamente 220.644 hectares, situada nos municípios de Porto Velho e Candeias do Jamari. A vegetação dessa unidade de conservação é composta por uma floresta ombrófila Aberta e Densa, típica da Amazônia e uma das atividades mais relevantes na unidade é o manejo florestal sustentável, com foco na produção de madeira e outros produtos florestais, além de atividades de pesquisa científica e educação

ambiental (Brasil, 2004). A FLONA do Jamari, criada pelo Decreto nº 90.224, de 25 de setembro de 1984, possui uma área de aproximadamente 215.000 hectares e está situada nos municípios de Itapuã do Oeste e Candeias do Jamari, assim como a FLONA do Jacundá, essa unidade de conservação é composta por floresta ombrófila densa e é destinada ao manejo florestal sustentável (Brasil, 1984).

A FLONA do Jamari é conhecida por ser uma das primeiras áreas no Brasil a adotar o modelo de concessão florestal, no qual empresas privadas podem explorar os recursos madeireiros de forma sustentável, sob supervisão do governo, sendo que essa iniciativa tem sido crucial para comprovar a viabilidade econômica e ambiental do manejo florestal sustentável na Amazônia (Amaral *et al.*, 2020).

A propriedade em questão possui uma área total de 190.210,00 hectares, dos quais 186.000 hectares (97,8% do total) estão averbados como Área de Manejo Florestal (AMF) (Figura 2). A exploração econômica da área é exclusivamente voltada para a produção sustentável de produtos e subprodutos florestais, sem outras atividades econômicas.

O clima da região é do tipo úmido e quente, com temperatura média anual de 24,5°C, além disso, o período quente ocorre de agosto a outubro, enquanto os meses mais frios são de abril a julho. A precipitação média anual é de aproximadamente 2.100 milímetros, com a estação chuvosa concentrada entre outubro e abril.

A vegetação da área é composta por três tipos principais: Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Bambu Dominante (Tabocal), Floresta Ombrófila Aberta Submontana com Bambu Dominado (Restinga) e Floresta Ombrófila Densa Aluvial com Dossel Emergente. Destaca-se que a presença de bambus do gênero *Guadua* predomina na região, sendo a Floresta Aberta de Bambu (Tabocal) a formação predominante.

As duas unidades estão situadas em municípios com diferentes pressões antrópicas e contextos de ocupação, possibilitando avaliar a adaptação do manejo sustentável a realidades locais. Apesar da distância, ambas são acessíveis e representativas da Amazônia ocidental, facilitando estudos comparativos sobre eficácia de políticas de conservação. Enquanto o Jamari concentra-se em concessões privadas, o Jacundá inclui atividades com comunidades e pesquisa, oferecendo uma visão ampla dos modelos de uso sustentável. Assim, a distância entre elas não é um obstáculo, mas uma vantagem metodológica, permitindo analisar diferentes estágios de implementação, características ecológicas e abordagens de manejo no mesmo bioma, fortalecendo as conclusões sobre conservação na Amazônia.

A área administrada pela AGROCOTEX no Amazonas amplia o escopo do estudo, trazendo a perspectiva de uma empresa privada com atuação interestadual (sede no Acre e operação no Amazonas), o que permite avaliar desafios logísticos, regulatórios e socioambientais em diferentes contextos. Enquanto as FLONAs de Rondônia são geridas sob modelos de concessão pública e uso múltiplo, a área da AGROCOTEX exemplifica o manejo conduzido pela iniciativa privada, oferecendo insights sobre eficiência operacional, compliance ambiental e integração com cadeias produtivas regionais. A distância geográfica entre esses locais não é um obstáculo, mas sim uma oportunidade para comparar práticas de manejo em variados ecossistemas amazônicos, regimes de gestão (público x privado) e pressões socioeconômicas, fortalecendo as conclusões sobre a viabilidade da exploração sustentável em larga escala na região.

4.2 Espécies estudadas e variáveis consideradas

Do total das espécies inventariadas pelas empresas, esta pesquisa analisou 6 espécies florestais madeireiras, as quais foram selecionadas considerando que algumas estão listadas como Vulneráveis pela Portaria MMA nº 443, de 17 de dezembro de 2014 (*Apuleia leiocarpa*, *Cedrela odorata*) e também pela recente inclusão na lista Cites que levou à publicação da Instrução Normativa 28/2024 Ibama no âmbito de exploração não-prejudicial (NDF). Algumas dessas espécies foram analisadas neste trabalho como: *Cedrela odorata*, *Dipteryx odorata* e *Handroanthus serratifolius*. As outras duas espécies foram selecionadas por possuírem características de fuste com grande comprimento (*Astronium lecointei* e *Clarisia racemosa*).

O banco de dados utilizado é proveniente de Inventários Florestais 100%, compreendendo uma grande diversidade de espécies madeireiras, e presentes em áreas de Manejo Florestal localizadas no estado do Amazonas, fornecidos pela empresa Agrocortex Madeiras do Acre e no estado de Rondônia, fornecidos pela empresa Madeflona S.A.

Os dados fornecidos pelas empresas foram obtidos a partir da realização do inventário florestal 100% executado anteriormente dentro das Unidades de Produção Anual (UPA). A metodologia empregada a época da realização dos inventários por parte das empresas foi o Modelo Digital de Exploração Florestal (Figueiredo; Braz; Oliveira, 2008).

Desta forma, todos os indivíduos inventariados foram georreferenciados com apropriação de coordenadas UTM, bem como tiveram suas dimensões medidas e registradas em planilha padrão. Considerou-se apenas as UPAs nas quais o inventário florestal foi realizado, sendo o inventário executado por uma equipe de campo com experiência e a altura dos indivíduos foi obtida com o auxílio de um hipsômetro.

Após a compilação dos dados, cada árvore das espécies definidas teve um total de oito variáveis consideradas as quais são descritas abaixo:

- a) Local, número da árvore e da UPA: para fins de controle das árvores de cada UPA avaliada;
- b) Nome Científico: para quantificar a ocorrência de cada espécie nas diferentes tipologias. Para fins de citação em tabelas e gráficos, padronizou-se uma sigla para o nome científico que consistiu na junção das três primeiras letras do nome genérico e específico, conforme exemplo a seguir: APULEI=*Apuleia leiocarpa*;
- c) Diâmetro à altura do peito (D): considerando um valor mínimo de 30 cm, utilizado para relacionar com a altura do fuste bem como para obter as classes de diâmetro considerando um intervalo de classe de 20 cm;
- d) Altura do fuste (h_f): altura medida a partir do solo até a inserção no fuste do primeiro ramo vivo (base da copa). Será utilizada como variável dependente para ajuste do modelo hipsométrico.

4.3 Análise e modelagem da relação H/D

Para testar a relação funcional entre a altura do fuste (h_f) e o diâmetro à altura de 1,30 m sobre o solo (D), considerou-se o modelo não-linear de Mitscherlich (Mitscherlich e Sonntag, 1982).

A expressão geral para esse modelo possui dois coeficientes de regressão (A e k). Entretanto pelas características dos dados de campo, optou-se por incluir um terceiro coeficiente (b) originando a seguinte expressão modificada:

$$h_f = 1,3 + A(1 - be^{(-k \cdot D)}) + \varepsilon_i$$

Em que:

D = diâmetro a 1,30 m;

h_f = Altura do fuste;

e = base do logaritmo natural;

A = representa a altura máxima esperada do fuste (Assíntota);

b = representa o parâmetro de ajuste da curvatura. Determina a altura inicial teórica do fuste;

k = representa a taxa de aumento da altura do fuste com o aumento do diâmetro, ou seja, indica quão rapidamente os valores de altura do fuste aumentam uma vez iniciada a curva frente ao aumento dos valores de diâmetro. O valor para k sempre será positivo e possui a mesma unidade para a altura do fuste;

1,3= constante para considerar a medição do diâmetro D a 1,3 metros de altura do solo.

A necessidade de inclusão do terceiro coeficiente de regressão no modelo de Mitscherlich se dá pelo fato de que os dados de inventário florestal 100% consideram o diâmetro mínimo de inclusão a partir de 30 ou 40 cm a depender do estado na Amazônia. Essa característica cria uma desconexão entre as premissas do modelo clássico de Mitscherlich com dois coeficientes e a realidade observada nos dados.

Portanto, a inclusão do o coeficiente b funciona como um fator de escala no termo exponencial, permitindo que a curva não inicie necessariamente na origem (0,0) sendo possível modelar situações onde árvores jovens já tem algum comprimento de fuste.

O procedimento de análise foi estruturado em duas etapas sequenciais:

Etapa 1: Avaliação do efeito da localidade

Inicialmente, testou-se a hipótese de que o comportamento da relação H/D poderia variar entre localidades, representadas pelas Áreas de Manejo Florestal (AMF) da Agro cortex (Amazonas) e Madeflona (Rondônia). Para cada uma das quatro espécies analisadas (*C. odorata*, *D. odorata*, *H. impetiginosus* e *H. serratifolius*), dois modelos foram ajustados:

- **Modelo reduzido:** sem considerar o efeito da localidade, assumindo uma única curva por espécie sem o fator localidade;

- **Modelo completo:** incluindo um parâmetro adicional na assíntota, condicionado à localidade (efeito fixo da localidade), permitindo deslocamento vertical da curva entre as duas áreas de manejo. Como existem apenas duas localidades, considerou-se esse efeito como fixo para prevenir a superparametrização.

Ambos os modelos incluíram um efeito aleatório para a espécie (capturando a variação na assíntota entre espécies). A estrutura geral do modelo misto foi definida como:

$$h_{f\ ij} = 1,3 + (A + \gamma_i + v_j) \cdot (1 - be^{(-k \cdot D_{ij})}) + \varepsilon_{ij}$$

Em que:

$h_{f\ ij}$ = Altura do fuste da árvore da *j*-ésima espécie na *i*-ésima localidade;

D_{ij} = Diâmetro à altura do peito da *j*-ésima espécie na *i*-ésima localidade;

A = Assíntota média geral;

γ_i = Efeito fixo da *i*-ésima localidade:

$$\gamma_i = \begin{cases} 0, & \text{se } i = \text{Agrocortex} \\ \delta, & \text{se } i = \text{Madeflona} \end{cases}$$

$v_j \sim N(0; \sigma_v^2)$ = Efeito aleatório da *j*-ésima espécie sobre a assíntota;

$\varepsilon_{ij} \sim N(0; \sigma^2)$ = Efeito aleatório dos resíduos.

Neste caso, a forma da curva (curvatura e taxa) é igual entre todas as combinações, mas a altura máxima prevista (Assíntota) pode variar por localidade e espécie. O parâmetro delta (δ) estima o efeito adicional na assíntota para a localidade Madeflona.

Para avaliar se o efeito da localidade (AMF) influencia significativamente a relação entre altura comercial (h_f) e diâmetro (D), utilizou-se o Teste de Razão de Verossimilhança (Likelihood Ratio Test – LRT), comparando dois modelos hierárquicos ajustados com o modelo de Mitscherlich.

A comparação entre os modelos foi realizada com base no teste LRT, cuja estatística é dada por:

$$LRT = -2 \cdot (\log L_{\text{reduzido}} - \log L_{\text{completo}})$$

ou, de forma equivalente, a diferença entre os critérios de log-verossimilhança dos dois modelos:

$$LRT = (-2LL_{reduzido}) - (-2LL_{completo})$$

O valor de "-2LL" representa o dobro negativo do logaritmo da função de verossimilhança do modelo ajustado, sendo amplamente utilizado como métrica de ajuste. Quanto menor o seu valor, melhor o modelo representa os dados observados. Além disso, ele serve como base para o teste de razão de verossimilhança (LRT), utilizado neste estudo para avaliar a significância da inclusão do efeito de localidade.

A estatística LRT segue aproximadamente uma distribuição qui-quadrado (χ^2) com 1 grau de liberdade, correspondente ao número de parâmetros adicionais no modelo completo (neste caso, o parâmetro δ do efeito da localidade).

Logo, a significância estatística foi avaliada com base no valor-p obtido a partir da distribuição χ^2 . A execução desse teste permitiu verificar se a relação H/D apresentava comportamento distinto entre as duas AMF analisadas.

Etapla 2: Modelagem com assíntotas aleatórias por espécie

Após a verificação da influência da localidade, procedeu-se ao ajuste do modelo final considerando a estrutura de agrupamento entre indivíduos por espécie. Para as espécies nas quais o efeito da localidade não foi significativo, o parâmetro da assíntota (A) foi tratado como um efeito aleatório por espécie, permitindo que a assíntota da curva variasse entre espécies de forma hierárquica, mas partilhando os mesmos parâmetros globais b e k .

Nos casos em que o efeito da localidade foi significativo, foram incorporadas assíntotas específicas por localidade ou, alternativamente, ajustados modelos separados por empresa, conforme a magnitude da diferença observada. A variância residual foi tratada de forma heterogênea, conforme a estrutura do erro em cada cenário, buscando garantir a melhor adequação do modelo às características dos dados empíricos.

4.4 Validação e análise da precisão do modelo

A metodologia adotada para a seleção da amostra de treinamento e validação considerou o método de amostragem estratificada proporcional, assegurando que a divisão dos dados preserve a proporção original de observações para cada espécie dentro de cada localidade (AMF) evitando a sub-representação de espécies com menor quantidade de dados minimizando possíveis vieses na modelagem e na validação do modelo ajustado.

Inicialmente, os dados foram organizados e estratificados por AMF e espécie. Em seguida, utilizou-se o procedimento PROC SURVEYSELECT para selecionar 70% das observações para o conjunto de treino e 30% para o conjunto de validação.

O conjunto de dados resultou em um total de 68633 árvores distribuídas em 6 espécies de acordo à Tabela 2.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para os dados de diâmetro à altura do peito (*D*) e comprimento do fuste (*hf*) por espécie e conjunto de dados.

Espécie	Dados	n	Diâmetro (cm)			Altura do fuste (m)		
			Média	Desvio	Min-Max	Média	Desvio	Min-Max
<i>Apuleia leiocarpa</i>	Treinamento	3921	84,50	25,72	35,97-190,99	18,33	3,82	3,36-30,91
	Validação	1679	84,23	26,08	36,92-181,44	18,40	3,86	6,00-30,00
<i>Astronium lecointei</i>	Treinamento	14045	62,77	14,28	31,83-163,00	24,28	4,53	4,70-40,00
	Validação	6018	62,55	14,19	35,65-135,00	24,29	4,43	5,51-41,04
<i>Cedrela odorata</i>	Treinamento	2091	65,36	18,36	37,00-169,00	15,01	3,39	3,68-29,00
	Validação	895	63,60	17,41	38,20-158,52	15,07	3,26	6,00-29,36
<i>Clarisia racemosa</i>	Treinamento	15451	58,95	11,99	35,01-197,35	16,32	3,02	4,28-29,49
	Validação	6621	58,89	11,73	35,01-127,32	16,30	3,01	4,10-30,00
<i>Dipteryx odorata</i>	Treinamento	9674	70,47	24,86	35,00-197,35	17,15	3,48	4,10-32,64
	Validação	4145	70,42	24,41	35,97-197,35	17,17	3,39	4,14-30,72
<i>Handroanthus serratifolius</i>	Treinamento	2866	69,49	21,77	38,20-181,44	21,61	4,77	5,00-37,89
	Validação	1227	68,12	21,70	38,20-163,93	21,33	4,69	4,98-35,73

Onde: *D* = diâmetro à altura de 1,30 m sobre o solo (m); *hf* = Comprimento do fuste (m).

4.5 Processo e ferramenta analítica utilizada

Todas as análises estatísticas foram realizadas no SAS System considerando o software SAS Studio (SAS/Stat).

A consolidação dos dados, ajustes dos modelos estatísticos, bem como elaboração de gráficos foram realizadas SAS Studio (Base SAS 9.4_M8; SAS/STAT 15.3) considerando um nível de significância de 0,05.

O ajuste do modelo não-linear misto foi realizado no PROC NLMIXED considerando o algoritmo de otimização utilizado para maximizar a log-verossimilhança pelo método Quasi-Newton (TECH=QUANEW). Esse método não requer cálculo direto da Hessiana em todas as interações, o que reduz o custo computacional.

As tabelas de frequência e as medidas descritivas no PROC TABULATE e PROC MEANS. A construção dos gráficos foi realizada no PROC SGPLOT e PROC SGPANEL.

RESULTADOS

5.1 Comportamento da relação por espécie e local

A Tabela 3 apresenta os valores de Log-verossimilhança (-2LL), Critério de Akaike corrigido (AIC) e o teste de razão de verossimilhança (LRT) para a comparação entre os modelos sem e com efeito da localidade (AMF) por espécie.

Com exceção de *D. odorata*, todas as espécies apresentaram efeito significativo de localidade no modelo de Mitscherlich de três parâmetros, indicando que o acréscimo do parâmetro de localidade (δ) melhora significativamente o ajuste dos modelos refletindo diferença significativa na relação entre o comprimento do fuste (h_f) e diâmetro (D) entre as localidades.

Tabela 3: Comparação entre os modelos com e sem efeito da localidade (AMF) por espécie.

Espécies	Sem efeito da AMF		Com efeito da AMF		LRT	Valor-p
	-2LL	AICc	-2LL	AICc		
<i>A. leiocarpa</i>	21593	21601	21127	21137	466	<0,001
<i>A. lecointei</i>	81481	81489	76428	76438	5053	<0,001
<i>C. odorata</i>	10827	10835	10384	10395	443	<0,001
<i>C. racemosa</i>	77287	77295	77205	77215	82	<0,001
<i>D. odorata</i>	50983	50991	51269	51279	-286	1,000
<i>H. serratifolius</i>	17083	17091	15252	15262	1831	<0,001

AMF= área de manejo florestal localizada em duas empresas: Agrocortex, AM e Madeflona, RO.

Para a espécie *D. odorata*, o teste de razão de verossimilhança resultou negativo indicando não significância para o efeito de localidade (AMF).

5.2 Modelagem com assíntotas aleatórias por espécie

O modelo final de Mitscherlich modificado incorporando efeito fixo para localidade (δ) sobre a assíntota e um intercepto aleatório por espécie possui a seguinte equação estimada para a localidade Agrocortex:

$$h_{fj} = 1,3 + (19,8553 + v_j) \cdot (1 - 0,5359 \cdot e^{(-0,0163 \cdot D_j)})$$

Para a localidade Madeflona, com efeito fixo estimado de $\delta=3,6305$, a equação estimada equivale a:

$$h_{fj} = 1,3 + (23,4858 + v_j) \cdot (1 - 0,5359 \cdot e^{(-0,0163 \cdot D_j)})$$

Os valores para o efeito aleatório de cada espécie sobre a assíntota (v_j) são os seguintes:

- $v_{A. leiocarpa} = -1,7894$
- $v_{A. lecointei} = 5,7680$
- $v_{C. odorata} = -4,0186$
- $v_{C. racemosa} = -4,2329$
- $v_{D. odorata} = -3,3238$
- $v_{H. serratifolius} = 2,3160$

A Tabela 4 mostra, em média, o valor máximo que o comprimento do fuste pode atingir com o aumento do diâmetro a altura do peito para cada espécie entre as localidades, ou seja, a assíntota (A) estimada pelo modelo de Mitscherlich modificado.

A variância residual (σ^2 residual) também é apresentada considerando como heterogênea entre espécies, mas constante entre localidades. Isso reflete a suposição de que a dispersão dos erros de predição da altura comercial pode variar conforme a espécie, mas não necessariamente segundo a empresa responsável pelo manejo.

Tabela 4: Estimativas da Assíntota e variâncias residual e aleatória por espécie e localidade de acordo ao modelo ajustado de Mitscherlich modificado.

Espécies	Localidade (AMF)	Assíntota (<i>A</i>)	σ^2 residual	σ^2 aleatória
<i>A. leiocarpa</i>	Agrocortex	18,0659	13,1660	7,3568
	Madeflona	21,6964		
<i>A. lecointei</i>	Agrocortex	25,6233	15,6091	
	Madeflona	29,2538		
<i>C. odorata</i>	Agrocortex	15,8367	8,4136	
	Madeflona	19,4672		
<i>C. racemosa</i>	Agrocortex	15,6224	8,8657	
	Madeflona	19,2529		
<i>D. odorata</i>	Agrocortex	16,5315	12,8292	
	Madeflona	20,1620		
<i>H. serratifolius</i>	Agrocortex	22,1713	13,6535	
	Madeflona	25,8018		

A variância aleatória (σ^2 aleatória) da assíntota foi modelada como única entre espécies e empresas, assumindo que a variabilidade entre as espécies quanto à assíntota é constante nas duas localidades.

A partir da equação ajustada de Mitscherlich construiu-se as curvas estimadas para a Área de Manejo Florestal da Agrocortex e Madeflona conforme mostra as Figuras 2x e 2c, respectivamente.

A análise das assíntotas estimadas para cada espécie, conforme o modelo de Mitscherlich modificado, revelou diferenças marcantes entre as duas áreas de manejo florestal estudadas: Agrocortex (Amazonas) e Madeflona (Rondônia). Em cinco das seis espécies avaliadas, as árvores localizadas na Madeflona apresentaram assíntotas superiores, indicando que o comprimento máximo do fuste tende a ser mais elevado nessa localidade. Essa constatação reforça a importância de considerar o efeito da localidade na modelagem da relação altura-diâmetro, uma vez que fatores ambientais e práticas de manejo influenciam diretamente o crescimento das árvores.

Para a espécie *Astronium lecointei*, a assíntota estimada na Madeflona foi de 29,25 m, enquanto na Agrocortex foi de 25,62 m, uma diferença de quase 4 metros. Resultado semelhante foi observado para *Handroanthus serratifolius*, cuja assíntota atingiu 25,80 m em Rondônia, contra 22,17 m no Amazonas. Esses valores indicam que, em Rondônia,

essas espécies têm maior capacidade de crescimento vertical, possivelmente devido a condições edafoclimáticas mais favoráveis, menor competição intraespecífica, ou maior eficiência nas práticas de manejo aplicadas na região.

Outras espécies também apresentaram diferenças relevantes. No caso de *Cedrela odorata*, a assíntota foi de 19,47 m na Madeflona, contra 15,83 m na Agro cortex, o que representa uma diferença proporcionalmente significativa. Da mesma forma, *Clarisia racemosa* e *Apuleia leiocarpa* também apresentaram fustes mais longos na Madeflona, com assíntotas de 19,25 m e 21,69 m, respectivamente, superiores às estimativas na Agro cortex. Essas discrepâncias apontam para um padrão consistente de crescimento mais vigoroso em Rondônia para as espécies estudadas, com exceção de *Dipteryx odorata*, que não apresentou diferença significativa entre as localidades.

A ausência de diferença estatística para *Dipteryx odorata* sugere que essa espécie pode possuir maior estabilidade fenotípica em relação ao crescimento em altura, mesmo sob diferentes condições ambientais. Isso pode indicar que sua expressão de crescimento vertical é menos sensível às variações de sítio ou manejo, o que é uma característica relevante do ponto de vista silvicultural, principalmente para espécies de interesse comercial e distribuição ampla. A uniformidade da assíntota nessa espécie também reforça a necessidade de análises individualizadas por espécie em estudos hipsométricos.

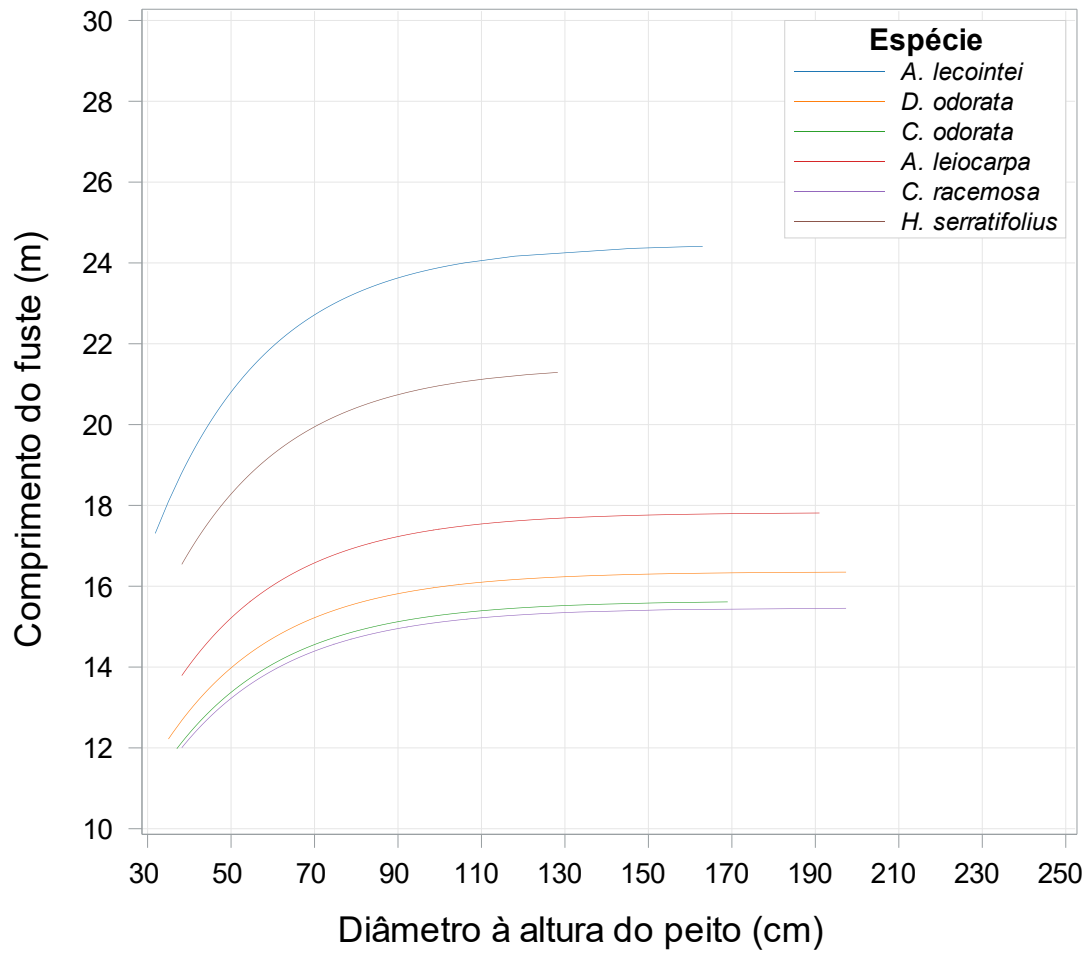


Figura 2x: Curvas estimadas por Mitscherlich mostrando as assíntotas para cada espécie na AMF da Agro cortex.

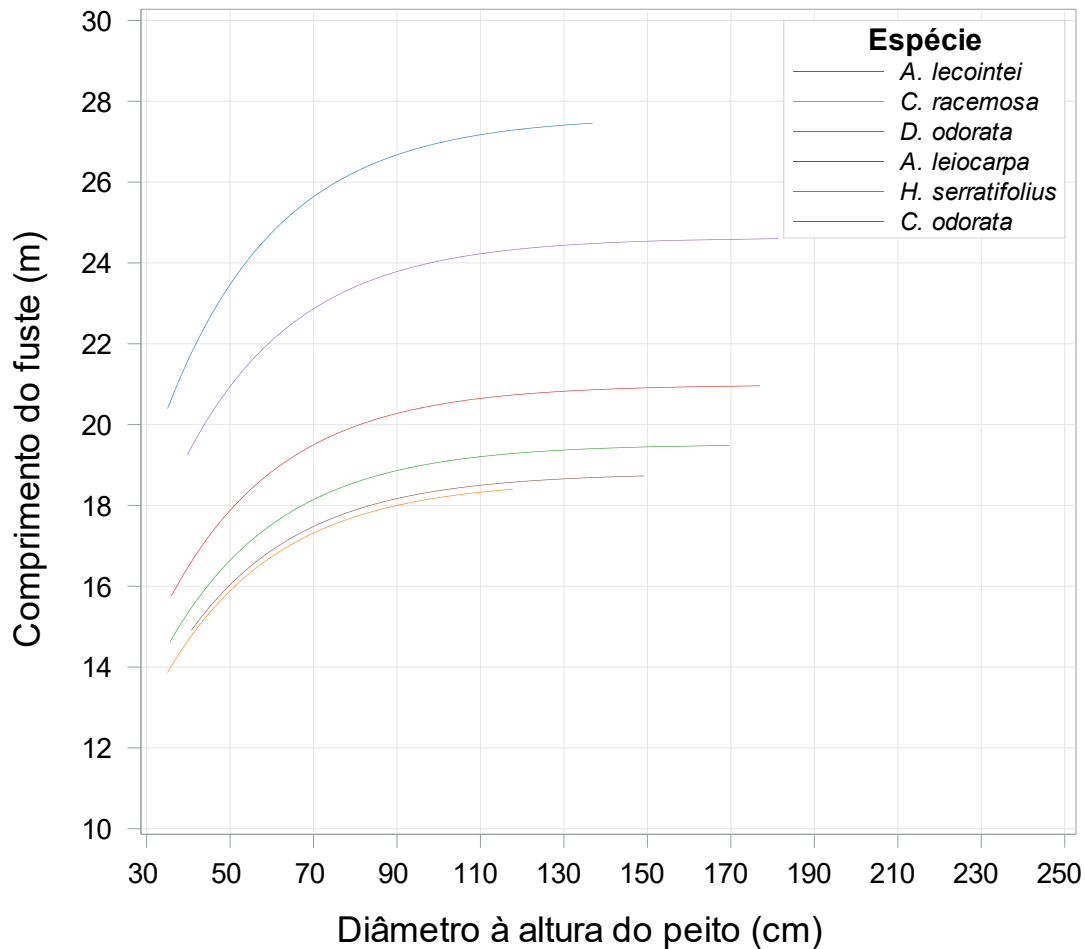


Figura 2c: Curvas estimadas por Mitscherlich mostrando as assíntotas para cada espécie na AMF da Madeflona.

As Figuras 2x e 2c ilustram visualmente essas diferenças, evidenciando que, para um mesmo intervalo de diâmetro, as curvas estimadas para a Madeflona estão sistematicamente acima daquelas ajustadas para a Agro cortex. Essa tendência se acentua a partir de 60 cm de DAP, faixa diamétrica em que as diferenças de crescimento tornam-se mais evidentes. Essas evidências reforçam que a aplicação de modelos ajustados regionalmente é fundamental para estimativas precisas de volume e para o planejamento eficaz das operações de manejo florestal sustentável.

A análise das assíntotas estimadas pelo modelo de Mitscherlich modificado, conforme apresentado na Tabela 4 e visualizado nas Figuras 2x (Agro cortex) e 2c (Madeflona), evidencia diferenças significativas na extensão média dos fustes das árvores entre as duas localidades de manejo florestal avaliadas. As assíntotas representam o limite teórico máximo do comprimento do fuste (hf) estimado em função do aumento do

diâmetro à altura do peito (D), sendo, portanto, um indicador do potencial de crescimento vertical das espécies em determinado contexto ambiental e de manejo.

De modo geral, os resultados indicam que as árvores localizadas na área da Madeflona (Rondônia) tendem a apresentar fustes mais longos, quando comparadas às mesmas espécies na área da Agro cortex (Amazonas). Para todas as espécies analisadas — com exceção de *Dipteryx odorata*, que não apresentou diferença estatística significativa de localidade ($p > 0,05$) — as assíntotas estimadas foram mais elevadas na Madeflona. Por exemplo:

- Para *Astronium lecontei*, a assíntota foi de 29,25 m na Madeflona, contra 25,62 m na Agro cortex;
- Para *Handroanthus serratifolius*, observou-se 25,80 m na Madeflona versus 22,17 m na Agro cortex;
- Já *Cedrela odorata* apresentou 19,47 m na Madeflona, contra apenas 15,83 m na Agro cortex.

Essa tendência pode ser interpretada como reflexo de diferentes condições edafoclimáticas, práticas de manejo, histórico de uso da terra e composição estrutural da floresta entre as duas localidades. A maior expressão do fuste nas áreas da Madeflona pode estar associada a condições de sítio mais favoráveis ao crescimento vertical ou, ainda, à presença de uma estrutura de competição por luz mais intensa, o que induz o crescimento em altura das árvores em busca de iluminação.

A visualização gráfica das curvas nas Figuras 2x e 2c reforça essa conclusão, mostrando que, para diâmetros equivalentes, as alturas preditas para as árvores da Madeflona são sistematicamente superiores às da Agro cortex, especialmente a partir de 60 cm de DAP. Além disso, a maior homogeneidade estrutural das curvas da Madeflona pode indicar um padrão de crescimento mais regular, possivelmente associado ao histórico mais consolidado de manejo e às diretrizes de concessão florestal vigentes na região.

Do ponto de vista silvicultural, esses resultados destacam a importância de calibrar modelos hipsométricos por localidade, uma vez que a aplicação indiscriminada de um único modelo pode levar a erros sistemáticos de estimativa volumétrica, especialmente em projetos de manejo florestal sustentável que exigem precisão para licenciamento e planejamento operacional.

5.3 Validação do modelo de Mitscherlich

Com base nos dados de validação apresentados na Tabela 4, observa-se que os modelos ajustados de Mitscherlich apresentaram desempenho consistente entre os conjuntos de treino e validação. As médias e desvios-padrão das alturas do fuste (hf) estimadas nas amostras de validação não diferiram substancialmente das observadas na fase de treinamento, indicando boa generalização dos modelos ajustados para novos dados.

Além disso, a avaliação gráfica das curvas estimadas (Figuras 2x e 2c) revelou um padrão coerente com os valores médios das assíntotas calculadas para cada espécie e localidade. Nas áreas de manejo da Madeflona (RO), todas as espécies, exceto *Dipteryx odorata*, apresentaram assíntotas superiores às registradas para as mesmas espécies na Agro cortex (AM). Tais diferenças indicam que, em Rondônia, os fustes são mais longos em média, o que pode refletir melhores condições de sítio ou práticas de manejo diferenciadas.

O modelo ajustado demonstrou elevada capacidade de predição, com valores de R^2 superiores a 0,95, e variações residuais aceitáveis entre espécies. A aplicação do Teste de Razão de Verossimilhança (LRT) evidenciou que o acréscimo do parâmetro de localidade foi estatisticamente significativo para cinco das seis espécies analisadas, reforçando a necessidade de considerar o efeito da localidade no ajuste da equação hipsométrica.

Esses achados corroboram estudos anteriores que apontam a influência de fatores ambientais e regionais sobre a relação altura-diâmetro (CHAVE et al., 2005; FELDPAUSCH et al., 2012). Dessa forma, a validação dos modelos não apenas confirma sua precisão, mas também oferece subsídios técnicos valiosos para sua aplicação operacional no planejamento do manejo florestal sustentável.

5.4 Implicações no manejo florestal sustentável

A modelagem da relação hipsométrica utilizando o modelo de Mitscherlich modificado revelou-se uma ferramenta eficaz para subsidiar práticas técnicas de manejo florestal sustentável na Amazônia Ocidental. Os resultados obtidos apontaram para uma elevada capacidade preditiva do modelo, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,95 para todas as espécies analisadas, o que assegura a confiabilidade das estimativas de altura do fuste a partir do diâmetro à altura do peito (D).

Essa precisão é particularmente relevante em inventários florestais 100%, que demandam rapidez, acurácia e viabilidade econômica, especialmente em regiões de difícil acesso logístico.

Um dos principais achados deste estudo foi a influência significativa da localidade sobre a relação altura-diâmetro em cinco das seis espécies avaliadas, conforme demonstrado pelos testes de razão de verossimilhança (LRT). Tal constatação reforça a necessidade de calibração regional dos modelos hipsométricos, visto que fatores como condições edafoclimáticas, estrutura do dossel e práticas de manejo distintas influenciam diretamente o crescimento das árvores (Chave et al., 2005; Feldpausch et al., 2012).

O uso de modelos genéricos desconsiderando esses aspectos pode resultar em sub ou superestimativas do volume de madeira, comprometendo tanto a viabilidade técnica quanto a legalidade do manejo.

A diferenciação das assíntotas entre as localidades estudadas (Madeflona em Rondônia e Agro cortex no Amazonas) evidenciou variações estruturais relevantes. As árvores da Madeflona apresentaram fustes mais longos, indicando maior potencial produtivo ou adaptação a condições de competição vertical mais intensas.

Essas diferenças, quantificadas por meio das assíntotas estimadas para cada espécie e localidade, são decisivas para o planejamento da colheita, estimativa de rendimento volumétrico e definição de estratégias silviculturais adequadas ao contexto ambiental local.

A aplicação de modelos ajustados por espécie e localidade atende diretamente aos requisitos técnicos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 406/2009 e pela Norma de Execução nº 01/2007 do IBAMA, que regulam a exploração de florestas nativas e exigem estimativas confiáveis de volume e produtividade florestal.

Dessa forma, os resultados deste trabalho oferecem base técnica para elaboração de planos de manejo mais ajustados à realidade de campo, contribuindo para a legalidade e sustentabilidade das atividades de exploração madeireira na região.

Além dos ganhos operacionais, o uso de modelos hipsométricos calibrados pode representar economia de recursos financeiros e humanos, uma vez que reduz a necessidade de medição direta da altura do fuste, tarefa que é operacionalmente difícil e sujeita a erros em florestas tropicais densas (Larjavaara & Muller-Landau, 2013).

Esse aspecto é especialmente importante no contexto amazônico, onde a presença de bambuzais, como o *Guadua sp.*, limita a visibilidade e dificulta o uso de instrumentos tradicionais como o hipsômetro (Ferreira, 2014).

Do ponto de vista ambiental, a acurácia nas estimativas de altura comercial permite um cálculo mais preciso do volume de madeira, o que reduz o risco de superexploração e contribui para o equilíbrio entre produção e conservação.

O manejo florestal baseado em estimativas confiáveis favorece a regeneração natural, evita a remoção excessiva de indivíduos e assegura a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos prestados pela floresta (Garrett et al., 2021; De Petris et al., 2022).

Ademais, os modelos ajustados também podem ser utilizados como base para sistemas de monitoramento da dinâmica florestal, integrando dados de inventário com geotecnologias, como sensoriamento remoto e LiDAR, conforme sugerido por estudos recentes (Dubayah et al., 2020; Almeida et al., 2022).

Essa integração tecnológica representa um avanço importante para a bioeconomia amazônica, ao permitir maior precisão na estimativa de estoques e na identificação de áreas prioritárias para conservação ou uso racional dos recursos florestais.

Reforça-se então a importância da ciência aplicada à mensuração florestal como suporte técnico à tomada de decisão no manejo sustentável. A adoção de equações hipsométricas calibradas regionalmente, associadas a ferramentas analíticas robustas, possibilita a execução de práticas mais responsáveis, economicamente viáveis e ambientalmente equilibradas, promovendo o uso racional dos recursos madeireiros da Amazônia de forma compatível com os princípios da sustentabilidade.

5 DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo evidenciaram de forma clara a superioridade dos modelos não lineares em relação aos modelos lineares tradicionais na estimativa da relação entre altura do fuste (hf) e diâmetro à altura do peito (D) em florestas tropicais da Amazônia Ocidental.

Os modelos lineares testados apresentaram desempenho bastante limitado, com coeficientes de determinação (R^2) baixos — por vezes inferiores a 0,07 — indicando que tais modelos não conseguem representar adequadamente a complexa dinâmica de crescimento vertical das espécies florestais nativas. Esse comportamento é comum em florestas naturais, cuja estrutura irregular, heterogeneidade de espécies e variação ambiental dificultam o ajuste por modelos de baixa flexibilidade (Campos; Leite, 2017).

Em contrapartida, os modelos que incorporaram transformações logarítmicas e funções de natureza exponencial demonstraram maior poder explicativo. O modelo com transformação logarítmica da variável dependente (hf) apresentou R^2 superiores a 0,97, evidenciando forte correlação entre as variáveis após a transformação.

Essa abordagem está alinhada aos achados de Chave et al. (2005), que destacam a eficácia das transformações logarítmicas na modelagem de relações alométricas em florestas tropicais, especialmente quando a altura é utilizada como variável de interesse para estimativa de biomassa ou volume comercial. Contudo, a simples aplicação de logaritmos à variável independente (D) não trouxe ganhos significativos, sugerindo que o crescimento em altura não segue uma relação log-linear direta com o diâmetro em ambientes tropicais densamente florestados.

Entre os modelos testados, o de Mitscherlich modificado apresentou desempenho robusto e biologicamente plausível, incorporando uma assíntota ajustável (A) e parâmetros adicionais (b e k) que conferem maior flexibilidade à curva de crescimento.

O uso de modelos não lineares mistos, com inclusão de efeitos aleatórios por espécie e efeitos fixos por localidade, permitiu capturar variações intrínsecas entre espécies e diferenças ambientais entre as áreas de manejo (Agrocortex e Madeflona). Tal abordagem resultou em R^2 ajustado superiores a 0,95 e resíduos com distribuição adequada, demonstrando a aderência do modelo aos dados empíricos.

A análise das assíntotas estimadas para cada espécie nas duas localidades revelou padrões consistentes de variação entre sítios. Em cinco das seis espécies analisadas, as árvores localizadas na Madeflona (Rondônia) apresentaram maiores assíntotas, ou seja,

maior altura máxima estimada do fuste, em comparação às mesmas espécies na Agro cortex (Amazonas). Por exemplo, *Astronium lecointei* alcançou uma assíntota de 29,25 m na Madeflona, frente a 25,62 m na Agro cortex.

Esse padrão se repetiu para *Handroanthus serratifolius* (25,80 m vs. 22,17 m), *Cedrela odorata* (19,47 m vs. 15,83 m) e outras espécies, sugerindo que fatores ecológicos, como disponibilidade de luz, tipo de solo, estrutura do dossel e pressão competitiva, influenciam diretamente no crescimento em altura das árvores.

Essas diferenças regionais reforçam a importância da calibração local de modelos hipsométricos, evitando o uso de equações generalistas que podem comprometer a acurácia das estimativas de volume e, conseqüentemente, os planos de manejo florestal.

A única exceção foi observada na espécie *Dipteryx odorata*, que não apresentou diferença estatisticamente significativa entre as localidades, o que pode indicar maior estabilidade fenotípica ou menor sensibilidade às variações ambientais. Do ponto de vista silvicultural, essa constatação é valiosa, pois sugere que algumas espécies podem ser modeladas com equações mais generalistas, enquanto outras exigem maior especificidade regional.

Além de fornecer estimativas confiáveis de altura do fuste, os modelos desenvolvidos neste estudo têm implicações práticas diretas no planejamento do manejo florestal sustentável.

A possibilidade de estimar a altura a partir do diâmetro permite reduzir significativamente o tempo e o custo das operações de inventário florestal, especialmente em áreas de dossel fechado e difícil acesso, como as florestas amazônicas dominadas por bambuzais (*Guadua* sp.) (Ferreira, 2014; Baia, 2018). Isso atende às exigências operacionais de órgãos reguladores, como o IBAMA e o CONAMA, e fortalece a base técnica para a emissão de autorizações de exploração e licenciamento ambiental.

A adoção desses modelos também promove ganhos ambientais e econômicos ao reduzir a margem de erro nas estimativas de volume, evitando tanto a subexploração quanto a superexploração dos recursos florestais. Estimativas mais precisas contribuem para a definição de ciclos de corte adequados, planejamento de estradas e pátios de estocagem, além de facilitar o acompanhamento da regeneração natural e da dinâmica da floresta pós-exploração.

A utilização de modelos validados como os aqui apresentados também permite sua integração com tecnologias como exemplo o LiDAR, sensoriamento remoto e

modelagem espacial, ampliando ainda mais seu potencial de aplicação (Dubayah et al., 2020; Garrett et al., 2021).

Por fim, destaca-se que, embora os modelos apresentem bom desempenho, sua eficácia depende da qualidade dos dados de entrada, principalmente da medição do DAP e da identificação correta das espécies.

Assim, a capacitação contínua das equipes de campo e o uso de protocolos padronizados de inventário são fundamentais para garantir a confiabilidade dos resultados. Ainda, a continuidade de pesquisas que explorem novas variáveis explicativas, como densidade do solo, regime hídrico e índice de sítio, poderá aprimorar ainda mais os modelos existentes, contribuindo para um manejo florestal cada vez mais baseado em ciência e adaptado à diversidade ecológica da Amazônia.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta dissertação confirmam, com elevada consistência estatística e aderência prática, a eficácia do modelo de Mitscherlich modificado na estimativa da altura do fuste de seis espécies florestais de interesse comercial na Amazônia Ocidental. O desempenho do modelo, evidenciado por coeficientes de determinação superiores a 0,95 e validação com dados independentes, atesta sua robustez como ferramenta analítica para aplicação em inventários florestais completos (100%), especialmente em contextos de difícil acesso e dossel fechado, onde a medição direta da altura apresenta limitações operacionais.

A verificação de diferenças estatisticamente significativas entre localidades para cinco das seis espécies analisadas destaca a importância da calibração regional das equações hipsométricas. A variação observada nas assíntotas entre as áreas de manejo florestal da Madeflona (RO) e da Agrocortex (AM) demonstra que fatores como condições edafoclimáticas, estrutura da floresta, práticas de manejo e pressão competitiva afetam significativamente o padrão de crescimento vertical das árvores. Portanto, o uso de modelos generalistas pode levar a erros sistemáticos nas estimativas volumétricas, impactando negativamente o planejamento de exploração, o licenciamento ambiental e a sustentabilidade das operações florestais.

Diante disso, recomenda-se fortemente a adoção de equações ajustadas localmente, com base em dados empíricos representativos das condições específicas de cada área de manejo. Essa prática contribui para o aumento da precisão técnica das estimativas, além de favorecer o cumprimento das exigências legais estabelecidas por órgãos reguladores, como o IBAMA e o CONAMA. A aplicação de modelos regionais permite não apenas melhorar a alocação de recursos operacionais no campo, mas também aprimorar o dimensionamento do estoque de madeira disponível, contribuindo para um uso mais racional e eficiente dos recursos florestais.

Adicionalmente, a integração dos modelos hipsométricos calibrados com ferramentas de geotecnologia, como LiDAR, fotogrametria com drones e sistemas de sensoriamento remoto orbital, representa um avanço promissor para o fortalecimento do manejo florestal sustentável e da bioeconomia amazônica. A aplicação conjunta dessas tecnologias permite mapear, com alta resolução e acurácia, a estrutura vertical da floresta, identificar áreas prioritárias para conservação e otimizar as atividades de exploração seletiva de madeira com base em critérios técnicos e ambientais bem fundamentados.

Dessa forma, esta dissertação oferece uma contribuição significativa para o aprimoramento das ferramentas de mensuração florestal, ao propor e validar um modelo estatístico robusto, sensível à diversidade ecológica regional e aplicável em contextos operacionais reais. Além disso, reforça a necessidade de continuidade em pesquisas que articulem modelagem estatística, ecologia florestal e inovação tecnológica, como forma de consolidar uma gestão florestal mais precisa, sustentável e orientada por evidências científicas

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, F. C.; DZIUBAT, A. S.; SILVA, G. M. X.; GARCIA, M. L.; CANTÓN, J. L. M. Planejamento da rede viária no manejo de floresta nativa utilizando SIG. **Nativa**, v. 11, n. 4, p. 582-591, 2023. DOI: 0.31413/nativa.v11i4.15624.
- ALMEIDA A, M. P.; MIGUEL, E. P.; SANTOS, M. L.; GASPAR, R. O.; SANTOS, C. R. C.; *et al.* Predicting teak tree (*Tectona grandis* Linn F.) height using generic models and artificial neural networks. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 11, p. 1243-1251, 2022. DOI: 10.3316/informit.949288318662172.
- AMARAL, P. **Manejo Florestal de Impacto Reduzido**. Belém: IMAZON, 2000.
- ANGELO, H.; SILVA, J. C.; ALMEIDA, A. N.; POMPERMAYER, R. S. Análise estratégica do manejo florestal na Amazônia brasileira. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 341-348, 2014. DOI: 10.5380/rf.v44i3.33979.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands**. 1 ed. Amsterdã: Pergamon Press, 1970. DOI: 10.1016/C2013-0-01587-3.
- BAIA, A. L. P. **Alometria de altura das árvores em florestas do nordeste da Amazônia e as implicações para estimativa de biomassa**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, Amapá, 2018. 81 f.
- BARROS, D. A. de; MACHADO, S. do A.; ACERBI JUNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.45, p. 3-28, jul./dez., 2004.
- BARTOSZECK, A. C. P. S.; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, E. B. Dinâmica da relação hipsométrica em função da idade, do sítio e da densidade inicial de povoamentos de bracatinga da região metropolitana de Curitiba, Paraná. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 517-533, 2004.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo de três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, n.60, p.149-163, dez. 2001.
- BERINGER, J.; *et al.* Balancing the environmental benefits of reforestation in agricultural regions. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 17, n. 4, p. 301-317, 2015. DOI: 10.1016/j.ppees.2015.06.001.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução N° 406, de 02 de fevereiro de 2009**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111081>>. Acesso em: 13 Dez 2024.

BRASIL. **Decreto de 01 de dezembro de 2004**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/dnn/dnn10374.htm>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BRASIL. **Decreto de nº 90.224, de 25 de setembro de 1984**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/atos/decretos/1984/d90224.html>. Acesso em: 12 nov. 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 fev. 1998.

BURKHART, H. E.; STRUB, M. R. A model for simulation of planted loblolly pine stands. *In: Growth models for tree and stand simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974. p. 128-135.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5 ed. Viçosa: Editora UFV, 2017.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, p. 87-99, 2005. DOI: 10.1007/s00442-005-0100-x.

COCHRAN, W. G. **Técnicas de amostragem**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura; 1965.

CUNNINGHAM, S. C.; MAC NALLY, R.; BAKER, P. J.; CAVAGNARO, T. R.; CURTIS, R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967. DOI: 10.1093/forestscience/13.4.365

CURTO, R. de A.; DEECKEN, B. P.; KOHLER, S. V.; BIAZATTI, S. C.; ARAÚJO, E. J. G.; *et al.* Operacionalidade de aplicativos de smartphone para mensuração de altura de árvores em região de ecótono Cerrado-Amazônia. **Revista Nativa**, v. 7, n. 2, p. 218-225, 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i2.6310.

CYSNEIROS, V. C.; PELISSARI, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SOUZA, L. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial e uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 295-304, 2017. DOI: 10.18671/scifor.v45n114.06.

DE PETRIS, S.; SARVIA, F.; BORGOGNO-MONDINO, E. About tree height measurement: theoretical and practical issues for uncertainty quantification and mapping. **Forests**, v. 13, n. 7, 969, 2022. DOI: 10.3390/f13070969.

DRAPER, N.; SMITH, H. **Applied regression Analysis**. 3 ed. John Wiley and Sons: New York, 1966.

DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 55-56, 1998. DOI: 10.5902/19805098351.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Práticas silviculturais em áreas de manejo florestal sustentável**. Brasília: EMBRAPA, 1984.

EMBRAPA. **Inventário Florestal Contínuo em Florestas Tropicais: A Metodologia Utilizada pela Embrapa-CPATU na Amazônia Brasileira**. Belém: Embrapa. 1984.

FERREIRA, E. J. L. O bambu é um desafio para a conservação e o manejo de florestas no sudoeste da Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 3, p. 46-51, 2014. DOI: 10.21800/S0009-67252014000300015.

FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; D'OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de precisão em florestas tropicais: modelo digital de exploração florestal**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2007.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos da biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269 p.

FLORIANO, E. P. **Inventário Florestal**. Rio Largo: Edição do Autor. 2021.

GARRETT, R. D.; CAMMELLI, F.; FERREIRA, J.; LEVY, S. A.; VALENTIM, J.; *et al.* Forests and sustainable development in the Brazilian Amazon: history, trends, and future prospects. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 46, p. 625-652, 2021. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-010228.

HESS, André Felipe *et al.* Ajuste de relação hipsométrica para espécies da Floresta Amazônica Adjustment of the hypsometric relationship for species of Amazon Forest. **Ambiência**, v. 10, n. 1, p. 21-29, 2014.

HORLE, D. C.; MENDONÇA, A. R.; CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO, N. Modelagem não linear do perfil longitudinal de fustes de *Pinus oocarpa*. **Cerne**, v. 16, n. 2, p. 177-184, 2010. DOI: 10.1590/S0104-77602010000200009.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Norma de Execução nº 1, de 31 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes para o manejo florestal sustentável no Brasil. 2007.

IBAMA. **Relatórios DOF 2017**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/flora-e-madeira/dof/relatorios-dof>>. Acesso em: 04 fev. 2024.

INSTITUTO DE FLORESTAS DO PARANÁ. **Manejo Florestal Sustentável: técnicas de monitoramento e conservação**. Curitiba: Instituto de Florestas do Paraná, 2016.

ITTO. INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Annual Review and Assessment of the World Timber Situation**. Yokohama: ITTO, 2017.

LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. C. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, p. 793-801, 2013. DOI: 10.1111/2041-210X.12071.

LEÃO, F. M.; NASCIMENTO, R. G. M.; EMMERT, F.; SANTOS, G. G. A.; CALDEIRA, N. A. M.; *et al.* How many trees are necessary to fit an accurate volume model for the Amazon forest? A site-dependent analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 480, 118652, 2021. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118652.

LEITE, H. G. **Modelos hipsométricos para estimativa de volume florestal**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. **Forest Inventory: Principles and Methods**. 2. ed. New York: Springer, 1973.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba: Editado pelos autores, 2003. 309 p.

MATA NATIVA. **Manual Técnico para Planejamento Florestal**. Belo Horizonte: Mata Nativa Publicações, 2019.

MENSAH, S.; PIENAAR, O. L.; KUNNEKE, A.; DU TOIT, B.; SEYDACK, A.; *et al.* Height-diameter allometry in South Africa's indigenous high forests: assessing generic models performance and function forms. **Forest Ecology and Management**, v. 410, p. 1-11, 2018. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.12.030.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa nº 5**. Diretrizes para a Exploração Sustentável de Recursos Florestais. Brasília: MMA, 2006.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Monitoramento da Infraestrutura Florestal em Áreas de Manejo Sustentável na Amazônia Legal**. Brasília: MMA, 2023.

NÄSLUND, M. The investigation of forest trees: height and diameter relationships. **Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut**, v. 34, p. 1-44, 1937.

PEREIRA, D.; SANTOS, D.; VEDOVETO, M.; GUIMARÃES, J.; VERÍSSIMO, A. **Fatos florestais da Amazônia 2010**. Imazon, Belém – PA, 2010.

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

RICHARDSON, V. A.; PERES, C. A. Temporal decay in timber species composition and value in Amazonian logging concessions. **PLoS ONE**, v. 11, n. 7, e0159035, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0159035.

ROS-TONEN, M. A. F.; VAN ANDEL, T.; MORSELLO, C.; OTSUKI, K.; ROSENDO, S.; *et al.* Forest-related partnerships in Brazilian Amazonia: there is more to sustainable forest management than reduced impact logging. **Forest ecology and Management**, v. 256, n. 7, p. 1482-1497, 2008. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.02.044.

SANTOS, J. N. B. **Equações alométricas para estimativa da área foliar de espécies lenhosas de floresta ombrófila de terras baixas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2016. 101 f.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT User's Guide, Version 9.1**. Cary, NC: SAS Institute, 2007.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria Florestal: medição e volumetria de árvores**. Textos técnicos. UFLA. Lavras, 1998.

SILVA, G. F.; MÔRA, R.; CURTO, R. A. Simulação de erros na medição de altura de árvores inclinadas com aparelhos baseados em princípios trigonométricos. **Nativa**, v. 5, n. 5, p. 372-379, 2017. DOI: 10.5935/2318-7670.v05n05a12.

SILVA, R. M.; MENDES, F. S.; SOUZA, D. V.; SILVA, J. R.; OLIVEIRA, A. L. P. Modelagem da relação hipsométrica para um povoamento urbano de *Swietenia macrophylla* King no município de Marabá, Pará, Brasil. **Agroecossistemas**, v. 11, n. 1, p. 183-199, 2019.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G. **Modelagem do crescimento e produção florestal: aplicações estatísticas e matemáticas em estudos de crescimento florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2011.

SOUZA, D. V.; CARVALHO, J. O. P.; MENDES, F. S.; MELO, L. O.; SILVA, J. N. M.; *et al.* Crescimento de espécies arbóreas em uma floresta natural de terra firme após a colheita de madeira e tratamentos silviculturais, no município de Paragominas, Pará, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 873-883, 2015. DOI: 10.5902/1980509820585.

STOLLE, L.; VELOZO, D. R.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, R. C.; BEUTLING, A. Modelos hipsométricos para um povoamento jovem de *Khaya ivorensis* A. Chev.

BIOFIX Scientific Journal, v. 3, n. 2, p.231-236, 2018. DOI: 10.5380/biofix.v3i2.58799.

VARGAS-LARRETA, L. B. **Analyse und Prognose des Einzelbaumwachstums in Struktureichen Mischbeständen in Durango Mexiko**. Dissertation. Universität Göttingen, Germany, 2006.

VIDAL, E.; GERWING, J.; BARRETO, P.; AMARAL, P.; JOHNS, J. S. **Redução de desperdícios a produção de madeira na Amazônia**. Série Amazônia, Belém: IMAZON, n. 5, 1997.

ZWEEDE, J. C.; PEREIRA, R.; BARRETO, P. Fase pré-exploratória para o manejo florestal em: Manejo Florestal Sustentável. Belém: IMAZON, 2002.

ALMEIDA, D. R. A. et al. Modelagem hipsométrica em florestas tropicais: avanços e desafios. Floresta, 2022.

ASSMANN, E. The Principles of Forest Yield Study. Pergamon Press, 1970.

BAIA, J. V. Desafios na medição de altura em florestas densas. Acta Amazônica, 2018.

CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks in tropical forests. Oecologia, 2005.

DE PETRIS, S.; SARVIA, F.; BORGOGNO-MONDINO, E. Forest inventory optimization using remote sensing. Remote Sensing, 2022.

DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de árvores individuais em floresta ombrófila mista. Ciência Florestal, 1998.

FERREIRA, M. L. Bambuzais e seus impactos no manejo florestal. Amazônia Científica, 2014.

LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. C. Measuring tree height in tropical forests. Biotropica, 2013.

LEÃO, F. M. et al. Modelos hipsométricos para florestas naturais: uma revisão. Floresta e Ambiente, 2021.

VARGAS-LARRETA, B. Modelos de volumen y crecimiento para manejo forestal. UPV, 2009.

DUBAYAH, R. et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI): A spaceborne lidar mission for forest structure and carbon monitoring. Remote Sensing of Environment, 2020.

DUNCANSON, L. et al. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. Remote Sensing of Environment, 2022.

HYYPÄ, J. et al. Advances in forest inventory using airborne laser scanning. Remote Sensing, 2020.

LEITOLD, V. et al. Modelagem de biomassa em florestas tropicais usando LiDAR e machine learning. Forest Ecology and Management, 2021.

PULITI, S. et al. Use of UAV photogrammetric data for estimating tree attributes in managed forests. Remote Sensing, 2020.

SAATCHI, S. et al. Benchmark maps of forest carbon stocks for REDD+ projects. PNAS, 2021.

WHITE, J. C. et al. Low-cost lidar and UAV applications in forest monitoring. Forests, 2023.

Burnham, K. P.; Anderson, D. R. **Model Selection and Multimodel Inference**. Springer, 2002.

Littell, R. C. et al. **SAS for Mixed Models**. SAS Institute, 2006.

Pinheiro, J. C.; Bates, D. M. **Mixed-Effects Models in S and S-PLUS**. Springer, 2000.

Willmott, C. J. **On the validation of models**. Physical Geography, 1981.

BINOTI, M. L. M. S. et al. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall na estimação da altura de povoamentos de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 37, n. 6, p. 1173-1179, 2013.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.

CURTIS, R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *Forest Science*, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.

HUANG, S. et al. Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. *Forest Ecology and Management*, v. 129, n. 1-3, p. 125-141, 2000.

MEHTÄTALO, L. et al. Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 45, n. 7, p. 826-837, 2015.

NÄSLUND, M. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt*, v. 29, n. 4, p. 1-169, 1936.

SCOLFORO, J. R. S. et al. *Inventário florestal*. Lavras: UFLA, 2019.

SCHNEIDER, P. R. et al. *Dendrometria*. Santa Maria: UFSM, 2017.

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

- BRASIL. Resolução CONAMA nº 406, de 2 de fevereiro de 2009. Dispõe sobre os procedimentos para o manejo florestal sustentável. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2009.
- CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, v. 145, p. 87–99, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- FELDPAUSCH, T. R. et al. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, v. 9, n. 8, p. 3381–3403, 2012. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração Florestal: perguntas e respostas*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2017.
- SCOLFORO, J. R. S. et al. Modelagem hipsométrica aplicada a inventários florestais em Minas Gerais. *Revista Árvore*, v. 43, n. 3, p. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000300001>
- VANCLAY, J. K. *Modelling Forest Growth and Yield: applications to mixed tropical forests*. Wallingford: CAB International, 1994.
- SCHNEIDER, P. R. et al. Ajuste e seleção de modelos hipsométricos para povoamentos de *Pinus taeda* L.. *Ciência Florestal*, v. 27, n. 4, p. 1321–1332, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509830287>
- BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Norma de Execução nº 01, de 10 de outubro de 2007. Estabelece diretrizes para o manejo florestal sustentável. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2007.
- FELICIANO, A. L. P. et al. Aplicação de modelos hipsométricos em florestas tropicais de terra firme na Amazônia Central. *Acta Amazonica*, v. 46, n. 4, p. 379–388, 2016.
- LEITE, H. G. Modelos hipsométricos: teoria, prática e aplicações. *Revista Árvore*, v. 41, n. 2, p. 1–12, 2017.
- MEHTÄTALO, L. et al. Generalized additive mixed models for modeling stand mean height. *Forest Ecology and Management*, v. 362, p. 241–250, 2015.