

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Caroline Ferreira de Jesus

**MODELOS SIGMOIDAIS NA ESTIMATIVA DA ALTURA DE FUSTES EM UM
SÍTIO FLORESTAL AMAZÔNICO, EM RONDÔNIA**

São João Evangelista – MG

2026

CAROLAINÉ FERREIRA DE JESUS

**MODELOS SIGMOIDAIS NA ESTIMATIVA DA ALTURA DE FUSTES EM UM
SÍTIO FLORESTAL AMAZÔNICO, EM RONDÔNIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do
Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – Campus São
João Evangelista para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá

São João Evangelista – MG

2026

J58m Jesus, Caroline Ferreira de.

Modelos sigmoidais na estimativa da altura de fustes em um sítio florestal amazônico, em Rondônia/ Caroline Ferreira de Jesus– 2026.

19f.: il.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2026.

1. Máxima verossimilhança. 2. Máxima qualidade. 3. Probabilidade. 4. Tamanho. I. Jesus, Caroline Ferreira de. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 634.9285

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Caroline Ferreira de Jesus

**MODELOS SIGMOIDAIS NA ESTIMATIVA DA ALTURA DE FUSTES EM UM
SÍTIO FLORESTAL AMAZÔNICO, EM RONDÔNIA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do
Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 08/05/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO OLIVEIRA LAFETA**
Data: 13/07/2026 10:03:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Bruno Oliveira Lafetá (Orientador)

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João

Evangelista

Documento assinado digitalmente
 **EDGARD GERALDO BERTOLI TRINDADE**
Data: 13/07/2026 10:09:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João

Evangelista

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FLAVIO NUNES COSTA**
Data: 13/07/2026 11:12:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mestrando Luiz Flávio Nunes Costa

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri– *Campus* Diamantina

Dedico esta conquista a Deus, que me ensinou a perseverar e a não desanimar. *"Espere no Senhor. Seja forte! Coragem! Espere no Senhor."* (Salmo 27:14)

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) pelo apoio logístico e estrutural para a realização do presente projeto.

Ao Serviço Florestal Brasileiro pela disponibilização gratuita dos dados do Inventário Florestal Nacional.

Ao meu estimado orientador Bruno, agradeço profundamente por todo o seu excelente trabalho e por ser uma pessoa tão dedicada, inteligente e competente. Sua dedicação e talento inspiram a todos. Tenho certeza de que um futuro brilhante o aguarda.

Aos meus pais, Paulo e Elza, agradeço pelo apoio emocional e financeiro que tornou possível minha jornada acadêmica. Sem vocês, tudo teria sido muito mais difícil. Meu eterno amor e gratidão.

As minhas queridas irmãs, Claudiane, Camila e Caroline, com todo o meu carinho e gratidão por sempre estarem ao meu lado.

RESUMO

A estimativa precisa da altura de fustes é essencial para inventários florestais, avaliação de estoque de madeira e planejamento de manejo sustentável, especialmente em ecossistemas tropicais complexos como a Amazônia. Este estudo avaliou o desempenho de três modelos sigmoidais – Morgan-Mercer-Flodin (MMF), Gompertz e Logístico – para estimar a altura total de fustes em uma área de domínio amazônico, no município de Porto Velho, em Rondônia – Brasil. O inventário compreendeu 26 conglomerados com quatro subunidades retangulares de 2.000 m², dispostas em cruz de Malta, totalizando 4.715 fustes com diâmetros à altura do peito (DAP) de 10cm a 191cm e alturas de 1,5m a 48m. A avaliação dos modelos considerou a Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), coeficiente de correlação de Pearson e Critério de Informação de Akaike (AIC). O modelo MMF apresentou menor dispersão em torno das alturas observadas e refletiu adequadamente o crescimento biológico assintótico dos fustes, mesmo para os maiores diâmetros. Conclui-se que o modelo MMF é eficiente e recomendável para estimativas hipsométricas em florestas amazônicas complexas.

Palavras-chave: Máxima verossimilhança. Máxima qualidade. Probabilidade. Tamanho.

ABSTRACT

Accurate estimation of tree height is essential for forest inventories, timber stock assessment, and sustainable management planning, especially in complex tropical ecosystems such as the Amazon. This study evaluated the performance of three sigmoidal models—Morgan-Mercer-Flodin (MMF), Gompertz, and Logistic—to estimate the total height of tree trunks in a Amazonian domain in the municipality of Porto Velho, Rondônia, Brazil. The inventory comprised 26 clusters with four rectangular subunits of 2,000 m², arranged in a Maltese cross, totaling 4,715 tree trunks with diameters at breast height (DBH) ranging from 10 cm to 191 cm and height from 1.5 m to 48 m. The evaluation of the models considered the Root Mean Square Error (RMSE), Pearson's correlation coefficient, and Akaike Information Criterion (AIC). The MMF model showed less dispersion than the observed height and adequately reflected the asymptotic biological growth of the stems, even for the largest diameters. It is concluded that the MMF model is efficient and recommended for hypsometric estimates in complex Amazonian forests.

Keywords: Maximum likelihood. High precision. Probability. Tree size.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da modelagem hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia (Modelo Morgan-Mercer-Flodin)	15
Figura 2 – Representação gráfica da modelagem hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia (Modelo Gompertz)	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos testados para a estimativa hipsométrica (H, m) de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, em Rondônia	12
Tabela 2 – Coeficientes e qualidade de ajustes dos modelos sigmoidais para a estimativa de alturas de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, em Rondônia.....	14

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATÉRIAS E MÉTODOS	12
3. RESULTADOS	14
4. DISCUSSÃO	16
5. CONCLUSÃO	18
REFERÊNCIAS	19

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia cobre cerca de 49,5% do território brasileiro e constitui o maior e mais diversos domínio florestal tropical do planeta, abrangendo estados das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste (IBGE, 2024). Apesar de sua importância ecológica e socioeconômica, a região enfrenta exploração ilegal e não planejada de recursos florestais, resultando em degradação ambiental, perda de biodiversidade e impacto negativo sobre os estoques de madeira.

Inventários florestais são ferramentas essenciais para quantificar e monitorar a vegetação, subsidiando políticas públicas, manejo sustentável e certificação florestal. Entretanto, a medição direta da altura total de árvores em florestas densas e complexas é operacionalmente desafiadora, demorada e sujeita a erros (SOARES et al., 2006). A modelagem hipsométrica surge como alternativa robusta, permitindo estimar alturas a partir de diâmetros de fustes, reduzindo a necessidade de medições extensivas em campo.

Apesar da ampla aplicação de modelos hipsométricos em povoamentos homogêneos e de rápido crescimento, há uma lacuna significativa no estudo de modelos sigmoidais aplicados em florestas naturais da Amazônia, caracterizadas por heterogeneidade estrutural, variabilidade de espécies e padrões de dominância vertical complexos. Poucos estudos avaliaram comparativamente diferentes modelos sigmoidais em inventários florestais amazônicos, limitando a capacidade de selecionar equações preditivas precisas para fustes de grandes diâmetros, que contribuem significativamente para o estoque madeireiro e a sustentabilidade do manejo.

Modelos sigmoidais, como Morgan-Mercer-Flodin (MMF), Gompertz e Logístico, são conhecidos por capturar de forma realista o crescimento assintótico das árvores, refletindo o comportamento biológico natural da relação altura-diâmetro (BATISTA et al., 2014; CAMPOS e LEITE, 2017). Avaliar comparativamente esses modelos em áreas de domínio amazônico representa uma oportunidade de preencher lacunas metodológicas, melhorar a precisão dos inventários e fornecer subsídios para manejo florestal sustentável.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo comparar o desempenho de diferentes modelos sigmoidais para a estimativa hipsométrica de fustes em uma área de floresta amazônica no município de Porto Velho, em Rondônia.

2. MATÉRIAS E MÉTODOS

Os dados biométricos foram provenientes do Inventário Florestal Nacional realizado em região de planície no município de Porto Velho, em Rondônia. A região se encontra em domínio florestal amazônico e possui clima do tipo Am, pela classificação do sistema internacional de Köppen. As médias anuais de precipitação e temperatura são de 2.216mm e 26,1°C, respectivamente (CLIMATE-DATA.ORG, 2024).

O inventário foi coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro e suas informações metodológicas/ quantitativas se encontram disponibilizadas no Sistema Nacional de Informações Florestais (SFB, 2024). A amostragem consistiu na distribuição sistemática de 26 conglomerados com quatro subunidades retangulares (20m × 100m) e perpendiculares em relação ao seu ponto central, em forma de cruz de malta; a distância entre as subunidades e o ponto central foi de 50m. Todos os fustes dos indivíduos lenhosos com diâmetro a 1,30m de altura do solo (DAP, cm), iguais ou superiores a 10,0cm, foram mensurados usando fita diamétrica. A altura total dos fustes (H, m) foi obtida com auxílio de vara graduada.

Foram testados três modelos de regressão não lineares (sigmoidais) para a estimativa da altura total em função do diâmetro de fustes (Tabela 1). Estes modelos são rotineiramente ajustados no setor florestal para a modelagem biométrica vegetal (CAMPOS e LEITE, 2017). Na análise de regressão, empregou-se o método iterativo de Levenberg-Marquardt. A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com os valores da Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$) e critério de informação de Akaike (*Akaike Information Criterion*, AIC). Menores valores de RQEM e AIC implicaram em melhor qualidade preditiva. Selecionaram-se as duas equações de melhor desempenho preditivo para as análises gráficas subsequentes, com margens de confiança a 99% de probabilidade.

Tabela 1 – Modelos testados para a estimativa hipsométrica (H, m) de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, em Rondônia.

Modelo	Forma de ajuste	Identificação/autor
M1	$H = \frac{\beta_0\beta_1 + \beta_2 DAP^{\beta_3}}{\beta_1 + DAP^{\beta_3}} + \varepsilon$	Morgan-Mercer-Flodin (MMF)
M2	$H = \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 DAP}} + \varepsilon$	Gompertz
M3	$H = \beta_0 / (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 DAP}) + \varepsilon$	Logístico

Fonte: elaborada pela autora, 2026.

É importante ressaltar que β_0 , β_1 , β_2 e β_3 correspondem a parâmetros dos modelos de regressão e ε corresponde ao erro aleatório. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R, versão 4.4.1 (R Core Team, 2024), ao nível de significância de 1%.

3. RESULTADOS

O inventário florestal contemplou 4.715 fustes, com DAP de 10cm a 191cm e altura total de 1,5m a 48m. Os parâmetros dos modelos testados e a qualidade dos ajustes estão apresentados na Tabela 2. As equações geradas apresentaram poucos desvios, com baixos valores de RQEM. Os coeficientes de correlação foram moderados e significativos ($r_{Y\hat{Y}} > 0,65$, $p \leq 0,05$). Os modelos ajustados de MMF e Gompertz exibiram menores valores de RQEM e AIC, além dos maiores coeficientes de correlação, sendo, portanto, selecionadas para as análises gráficas subsequentes.

Tabela 2 – Coeficientes e qualidade de ajuste dos modelos sigmoidais para a estimativa da altura de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, em Rondônia.

Modelo s	β_0	β_1	β_2	β_3	RQEM	$r_{Y\hat{Y}}$	AIC
M1	-24,9910	13,7235	301,8741	0,228	4,7424	0,6741**	28069
M2	30,6860	0,3664	0,0389	-	4,7665	0,6700**	28115
M3	29,3232	2,6009	0,0549	-	4,7794	0,6678**	28140

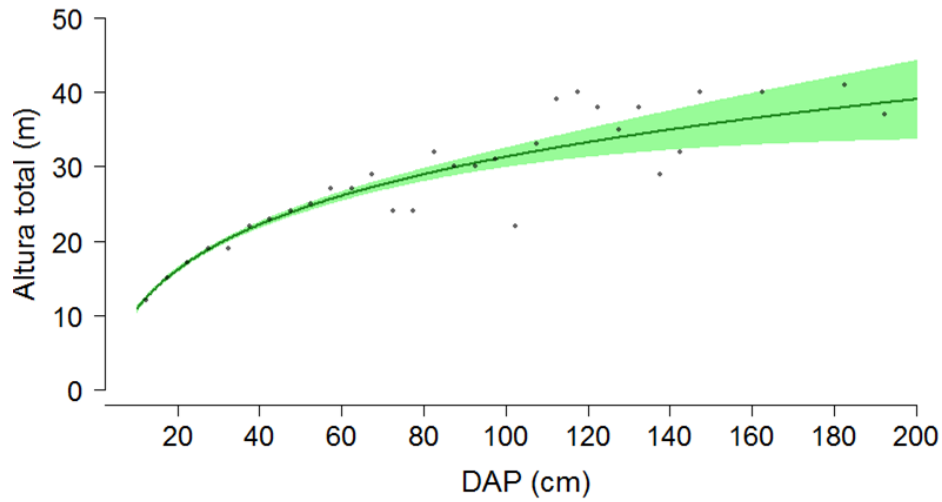
Nota: ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste *t*.

Fonte: elaborada pela autora, 2026.

Nesta tabela, β_0 , β_1 , β_2 e β_3 são os parâmetros dos modelos de regressão; RQEM corresponde à raiz quadrada do erro médio; $r_{Y\hat{Y}}$ é o coeficiente de correlação de Pearson e AIC é o critério de informação de Akaike.

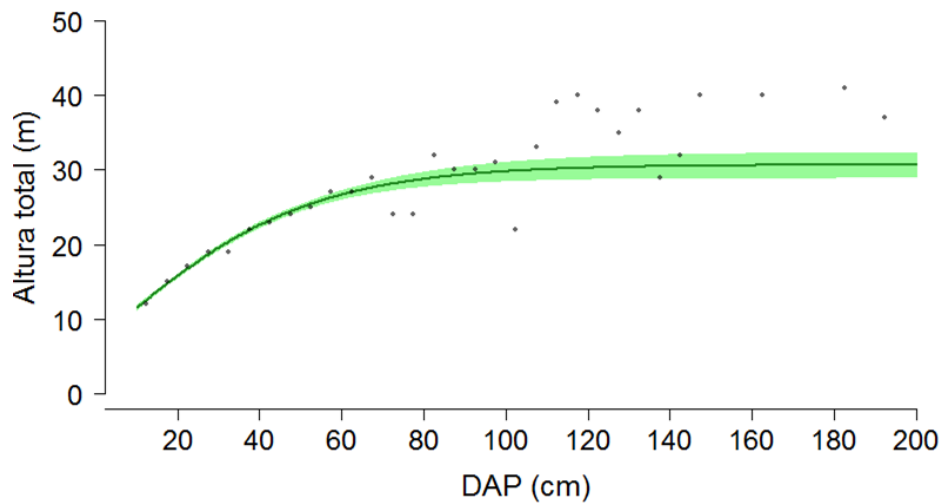
O comportamento sigmoidal foi observado em todas as curvas geradas a partir dos modelos hipsométricos, mostrados nas Figuras 1 e 2 a seguir. Pela análise das margens de confiança, verificou-se tendência de superestimativa da altura dos fustes de maior diâmetro nas equações obtidas com o ajuste do modelo de Gompertz. A equação oriunda do modelo de MMF se mostrou a mais acurada para a estimativa da altura de fustes na área de domínio amazônico estudada.

Figura 1 – Representação gráfica da modelagem hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia (Modelo Morgan-Mercer-Flodin).



Fonte: elaborada pela autora, 2026.

Figura 2 – Representação gráfica da modelagem hipsométrica de fustes em área de domínio amazônico no município de Porto Velho, Rondônia (Modelo Gompertz).



Fonte: elaborada pela autora, 2026.

Nas imagens acima, a cor verde é a margem de confiança a 99% de probabilidade e os pontos pretos são as médias de altura por classes diamétricas.

4. DISCUSSÃO

Este estudo estabeleceu e comparou relações funcionais sigmoidais para a estimativa da altura de árvores em uma floresta primária da Amazônia. A escolha do modelo hipsométrico é imprescindível para a quantificação do estoque de madeira, pois modelos mal especificados podem não capturar adequadamente a complexa relação altura-diâmetro (H-D), especialmente em ecossistemas hiperdiversos e estruturalmente heterogêneos como a Amazônia.

Nossa análise revelou que, embora todos os modelos testados (MMF, Gompertz e Logístico) apresentassem o formato sigmoidal esperado para o crescimento arbóreo, suas performances preditivas diferiram significativamente. O modelo de MMF demonstrou superioridade consistente, evidenciada pelos menores valores de RQEM e AIC, além de proporcionar uma representação biologicamente mais realista, particularmente para árvores de grande porte ($DAP > 80$ cm), para as quais o modelo de Gompertz tendeu a superestimar as alturas (Figuras 1 e 2).

O desempenho superior do MMF pode ser atribuído à sua maior flexibilidade paramétrica, representada pelo parâmetro β_3 . Diferentemente dos modelos Gompertz e Logístico, que possuem formas fixas de inflexão, o MMF permite uma variação na taxa de crescimento e no ponto de inflexão da curva, adaptando-se melhor à grande variabilidade arquitetural e de estratégias de crescimento encontrada em florestas tropicais maduras. Enquanto espécies pioneiras ou de dossel podem atingir a assíntota de altura rapidamente, espécies de sub-bosque ou emergentes gigantes apresentam trajetórias H-D distintas. A flexibilidade do MMF parece ser adequada para representar essa diversidade em uma curva geral para a comunidade, um desafio persistente na modelagem de florestas naturais.

Nossos resultados têm implicações práticas imediatas para o manejo florestal sustentável e a estimativa de carbono. A medição direta da altura em florestas densas e de dossel fechado é uma das operações de campo mais dispendiosas e sujeitas a erro. A adoção de um modelo localmente calibrado e preciso, como o MMF, pode otimizar drasticamente os inventários, permitindo estimativas confiáveis de altura a partir de medições de DAP, que são mais rápidas e precisas. Para árvores de grande diâmetro, que concentram uma parcela desproporcional da biomassa e do volume comercial, a acurácia é crítica. Superestimações sistemáticas, como as observadas no modelo de Gompertz, podem levar a erros na quantificação dos estoques do crescimento, comprometendo a sustentabilidade econômica do manejo e a credibilidade dos relatórios de estoques de carbono, para iniciativas como REDD+.

Além das aplicações em inventário, este estudo contribui para uma lacuna metodológica importante. A literatura sobre modelos H-D é vasta para plantações florestais e florestas temperadas (SOARES *et al.*, 2006; BATISTA *et al.*, 2014; CAMPOS e LEITE, 2017), mas comparativamente escassa para florestas tropicais primárias não perturbadas, especialmente na Amazônia brasileira. A demonstração da eficácia de um modelo flexível, como o MMF, neste contexto, fornece uma ferramenta valiosa para a comunidade científica e para agências de monitoramento florestal. Futuras pesquisas devem testar a portabilidade deste modelo em outras sub-regiões da Amazônia com diferentes solos, regimes hídricos e históricos de perturbação. Um passo crucial seria desenvolver equações hipsométricas específicas por grupos ecológicos (pioneiras, climáticas de dossel, emergentes) ou espécies comerciais, aumentando ainda mais a precisão.

A integração de modelos estatísticos robustos, como o MMF com tecnologias emergentes de sensoriamento remoto, representa uma fronteira promissora. Dados de altimetria a laser (LiDAR aerotransportado ou orbital, como o GEDI da NASA) podem fornecer estimativas diretas de altura para um subconjunto de árvores ou para a estrutura do dossel. Esses dados podem ser usados para calibrar ou validar modelos hipsométricos regionais, como o proposto, permitindo a extrapolação de estimativas de altura e biomassa para escalas paisagísticas com incertezas quantificadas. Esta sinergia entre dados de campo robustos, modelagem estatística adequada e sensoriamento remoto é essencial para criar sistemas de monitoramento florestal precisos, escaláveis e atualizados, necessários para combater o desmatamento e a degradação florestal.

Em síntese, a seleção criteriosa do modelo matemático é tão importante quanto a qualidade dos dados de campo. O modelo MMF emergiu como a ferramenta mais acurada e biologicamente plausível para descrever a relação H-D na complexa floresta estudada em Rondônia. Sua adoção pode melhorar significativamente a confiabilidade dos inventários florestais nacionais, a precisão das estimativas de biomassa e carbono, e o planejamento do manejo madeireiro de impacto reduzido. Recomendamos que futuros inventários, na Amazônia, considerem a inclusão do modelo MMF em suas análises de ajuste, contribuindo para um conjunto de ferramentas padronizadas e validadas para a mensuração e conservação do maior bioma florestal tropical do mundo.

5. CONCLUSÃO

O modelo hipsométrico de Morgan-Mercer-Flodin apresentou melhor desempenho para a estimativa da altura de fustes na área de floresta amazônica estudada em Porto Velho, Rondônia, refletindo com maior precisão o crescimento assintótico das árvores, inclusive em fustes de maiores diâmetros. Sua utilização possui implicações práticas relevantes para manejo florestal, monitoramento de estoque e certificação ambiental, podendo reduzir a necessidade de medições extensivas em campo. Estudos futuros podem ampliar a aplicação do modelo para diferentes espécies, fitofisionomias e integração com técnicas de sensoriamento remoto, contribuindo para inventários florestais mais precisos, gestão sustentável e políticas públicas eficazes na Amazônia.

REFERÊNCIAS

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais**: árvores, arvoredos e florestas. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. 5. ed. Viçosa: UFV. 2017. 636p.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima**: Porto Velho. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rondonia/porto-velho-3120/>>. Acesso em: 01 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Amazônia Legal**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15819-amazonia-legal.html>>. Acesso em: 01 ago. 2024.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2024.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Sistema nacional de informações florestais**. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/inventario-florestal-nacional-ifn>>. Acesso em 1 ago. 2024.

SOARES, C. P. B., PAULA NETO, F., SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 1. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276p.