

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

Luiz Flávio Nunes Costa

**ALTURA DOMINANTE PARA PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NA
AMAZÔNIA OCIDENTAL BRASILEIRA**

São João Evangelista

2025

LUIZ FLÁVIO NUNES COSTA

**ALTURA DOMINANTE PARA PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NA
AMAZÔNIA OCIDENTAL BRASILEIRA**

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

2025

C837a Costa, Luiz Flávio Nunes.

Altura dominante para predição da distribuição diamétrica na Amazônia ocidental brasileira/ Luiz Flávio Nunes Costa – 2025.

28f.: il.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2025.

1. Altura dominante. 2. Inventário florestal nacional. 3. Redistribuição teórica de diâmetros. 4. Sítios inequidâneos. I. Costa, Luiz Flávio Nunes. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 634.928

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333


Luiz Flávio Nunes Costa

**ALTURA DOMINANTE PARA PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA NA
AMAZÔNIA OCIDENTAL BRASILEIRA**

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 29/10/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO OLIVEIRA LAFETA**
Data: 12/11/2025 08:05:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá (Orientador)

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

Documento assinado digitalmente
 **JONATHAN DA ROCHA MIRANDA**
Data: 24/11/2025 17:07:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda

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

Documento assinado digitalmente
 **IVAN DA COSTA ILHEU FONTAN**
Data: 25/11/2025 12:31:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ivan da Costa Ilhéu Fontan

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, principalmente minha mãe Simone Nunes da Costa, meu pai José Luiz Alves da Costa, minha irmã Márcia Eduarda Nunes de Sá e minha companheira Tailhane Luiza Andrade de Sousa, por todo apoio e incentivo.

Ao meu orientador, Dr. Bruno Oliveira Lafetá, expresso minha gratidão pela confiança depositada. Agradeço também aos professores Dr. Jonathan da Rocha Miranda, Dr^a. Caroline Junqueira Sartori e Dr. Ivan da Costa Ilhéu Fontan, por contribuírem de forma significativa para minha formação profissional. Ao Adair Aparecido da Silva, pela parceria construída no período de atuação no viveiro de mudas

Por fim, agradeço a todos os colegas e amigos da turma EFL-211, pelo companheirismo e pela jornada compartilhada ao longo de toda a graduação.

RESUMO

Investigações científicas sobre a representação matemática de distribuições diamétricas são fundamentais para a sustentabilidade do manejo de florestas naturais, onde desafios complexos exigem abordagens inovadoras que conciliem produção e conservação. O objetivo do trabalho foi avaliar a modelagem da redistribuição teórica de diâmetros em sítios com diferentes condições de dominância vertical no estado de Rondônia, Amazônia brasileira. As informações biométricas foram provenientes do Inventário Florestal Nacional realizado em 26 municípios do estado, com a instalação sistemática de 96 conglomerados em forma de cruz de Malta. A modelagem da redistribuição diamétrica se baseou no ajuste do modelo Logístico para a estimativa dos parâmetros de quatro funções de densidade probabilística (Weibull 2P, Logística 2P, Normal e Log-normal) a partir da altura dominante calculada em cada conglomerado. O modelo Logístico foi eficiente para redistribuir teoricamente os diâmetros em sítios com diferentes dominâncias verticais, proporcionando estimativas precisas dos parâmetros da função Weibull-2P. Conclui-se que a utilização da altura dominante como variável preditora constitui uma alternativa promissora para a modelagem da redistribuição teórica de diâmetros em florestas naturais. Sítios com maior dominância vertical e mais diversos estruturalmente tendem a exibir distribuições diamétricas com cauda mais pronunciada à direita.

Palavras-chave: altura dominante. inventário florestal nacional. redistribuição teórica de diâmetros. sítios inequiâneos.

ABSTRACT

Scientific investigations into the mathematical representation of diameter distributions are essential for the sustainable management of natural forests, where complex challenges require innovative approaches that reconcile production and conservation. This work aimed to evaluate the modeling of theoretical diameter redistribution in sites with different conditions of vertical dominance in the state of Rondônia, Brazilian Amazon. Biometric data were obtained from the National Forest Inventory conducted in 26 municipalities of the state, through the systematic installation of 96 clusters arranged in a Maltese cross design. The modeling of theoretical diameter redistribution was based on fitting the Logistic model to estimate the parameters of four probability density functions (Weibull 2P, Logistic 2P, Normal, and Log-normal) using dominant height calculated in each cluster. The three-parameter Logistic model proved effective in theoretically redistributing diameters across sites with different vertical dominance, yielding precise estimates for the Weibull 2P function. It is concluded that dominant height is a promising predictor variable for modeling theoretical diameter redistribution in natural forests. Sites with greater vertical dominance and higher structural diversity tend to exhibit diameter distributions with a more pronounced right-hand tail.

Keywords: dominant height. national forest inventory. theoretical diameter redistribution. uneven-aged sites.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Boxplot de altura total do estrato vertical dominante em conglomerados localizados na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil. 15
- Figura 2 - Representação gráfica da estimativa dos parâmetros da função Weibull 2P para diferentes alturas dominantes em conglomerados localizados na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil. Vermelho claro representa as margens de confiança. 17
- Figura 3 - Superfície de resposta da frequência relativa de fustes, calculada a partir da redistribuição teórica de diâmetros com base nos parâmetros da função Weibull 2P, estimada a partir de informações de altura dominante na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil. A superfície em vermelho delimita o espaço definido pela estimativa do diâmetro máximo, calculada a partir do intervalo inventariado de altura dominante. 18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções de densidade probabilística testadas para a modelagem da distribuição diamétrica em conglomerados localizados na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.	13
Tabela 2 - Coeficientes e qualidade de ajuste do modelo logístico para a estimativa do diâmetro máximo (DAP máx., cm) e dos parâmetros de funções de densidade probabilística, utilizando a altura dominante (m) como variável preditora, aplicados à região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.	16
Tabela 3 - Estatística descritiva do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov calculadas para as redistribuições teóricas de diâmetro estimadas em sítios com diferentes alturas dominantes na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.	16

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 Descrição da base de dados.....	12
2.2 Distribuição diamétrica por conglomerado	12
2.3 Redistribuição teórica de diâmetros	13
3. RESULTADOS	14
4. DISCUSSÃO	18
5. CONCLUSÕES.....	22
REFERÊNCIAS	23

1. INTRODUÇÃO

O manejo sustentável na Amazônia é fundamental para conciliar a produção madeireira com a conservação da biodiversidade, atendendo a uma demanda da sociedade por modelos econômicos que reduzam o desmatamento ilegal e promovam o desenvolvimento regional. O sucesso do manejo em florestas naturais depende de informações biométricas detalhadas e confiáveis para um adequado planejamento de intervenções silviculturais e dimensionamento de múltiplos produtos. A caracterização da distribuição diamétrica consiste na quantificação da frequência de fustes em classes de diâmetro, etapa imprescindível para discriminar a estrutura regenerante e estimar o estoque de madeira comercial disponível para diferentes finalidades tecnológicas (CASAS *et al.*, 2024; LAFETÁ *et al.*, 2024; OGANNA *et al.*, 2025; STEPKA *et al.*, 2025).

A distribuição diamétrica é convencionalmente modelada por meio de funções de densidade probabilística, incluindo Weibull, Normal, Lognormal, Gama, Logística, Log-logística, Cauchy, Johnson's SB, Beta, Frechet, Erlang, Rayleigh e Hiperbólica (CAMPOS; LEITE, 2017; CASAS *et al.*, 2024; LAFETÁ *et al.*, 2018; ÖZÇELİK *et al.*, 2023). Dentre elas, a função Weibull de dois parâmetros destaca-se pela sua versatilidade e capacidade em descrever inúmeros padrões biométricos (ALKAN *et al.*, 2025; BAILEY; DELL, 1973; PENIDO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019). Contudo, ainda persistem incertezas quanto ao comportamento estrutural do diâmetro em sítios inequívocos sob diferentes condições de dominância vertical.

A modelagem da redistribuição teórica de diâmetros por sua vez, é uma técnica estatística originalmente proposta para plantações de pinus (CLUTTER; BENNETT, 1965), que utiliza regressões para a estimativa dos parâmetros de funções de densidade probabilística, com base em atributos do povoamento como idade e medidas de densidade. Trata-se de uma técnica consolidada para prognosticar a estrutura de povoamentos equívocos ao longo do tempo (ALKAN *et al.*, 2025; CAMPOS; LEITE, 2017; PENIDO *et al.*, 2020; ÖZÇELİK *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2019).

Em florestas naturais, porém, a aplicação da redistribuição teórica de diâmetros é limitada pela complexidade etária, genética e estrutural inerente a esses ecossistemas. Um dos principais desafios é a definição de uma idade de referência para a parametrização dos modelos (LAFETÁ *et al.*, 2024), tarefa dificultada pela regeneração contínua e pelos ciclos de crescimento assimétricos típicos dessas formações florestais (GILES *et al.*, 2024; PINTO *et al.*, 2025; REIS *et al.*, 2018; RODRIGO *et al.*, 2024).

Diante dessas limitações, o presente estudo propõe uma abordagem alternativa para a aplicação da redistribuição teórica de diâmetros em sítios inequívocos, utilizando a altura dominante como variável preditora dos parâmetros de funções de densidade probabilística. Diferentemente das abordagens tradicionais, essa proposta não visa a modelagem temporal da dinâmica estrutural, mas sim a previsão espacial da distribuição diamétrica, ampliando o poder de generalização das equações para diferentes condições de dominância vertical. Enfatiza-se, no entanto, que a relação entre altura dominante e a capacidade produtiva do sítio nem sempre é direta. Isso ocorre porque diferentes sítios podem estar em estágios distintos de desenvolvimento florestal, resultando em variações temporárias na expressão da produtividade (LI *et al.*, 2025; MORAIS *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2025; RODRIGO *et al.*, 2024; SHIMABUKURO *et al.*, 2025; STEPKA *et al.*, 2025).

A implementação consistente da modelagem requer atenção desde a escolha da função de densidade até a definição do modelo de regressão para a redistribuição teórica de diâmetros. Modelos de regressão não lineares de característica sigmoideal são rotineiramente ajustados para a representação do crescimento e produção florestal (CAMPOS; LEITE, 2017). No caso do modelo logístico, sua base biológica e a clareza na interpretação dos parâmetros propiciam uma rápida análise de confiabilidade das estimativas e de desempenho do algoritmo durante a convergência (LAFETÁ *et al.*, 2020). Em sua forma clássica, o modelo é definido por três parâmetros; a assíntota horizontal, o ponto de inflexão e o fator de escala, que juntos descrevem a curvatura do processo modelado.

A abordagem proposta avança metodologicamente ao integrar a altura dominante como variável preditora em um contexto ainda pouco explorado de redistribuição diamétrica em florestas naturais. O potencial dessa estratégia, aliado ao uso de geotecnologias emergentes, inclui a obtenção de estimativas estruturais sem a necessidade de medições manuais. Aeronaves remotamente pilotadas, equipadas com sensores Light Detection and Ranging (LiDAR) ou câmeras fotogramétricas, captam informações hipsométricas em larga escala, reduzindo o esforço amostral e tornando mais eficiente a descrição estrutural e o planejamento da exploração madeireira (BRIGANTE *et al.*, 2025; COSTA *et al.*, 2025; D'OLIVEIRA *et al.*, 2021; FERNANDES *et al.*, 2025; OLIVEIRA *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2025; WINSTANLEY *et al.*, 2024).

Mediante exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: I) o modelo de regressão logístico é adequado para estabelecer relações funcionais entre a altura dominante e parâmetros de funções; II) a redistribuição teórica de diâmetros baseada na altura dominante mantém acurácia preditiva, mesmo em sítios com diferentes condições de dominância vertical. O

objetivo do presente trabalho foi avaliar a modelagem da redistribuição teórica de diâmetros em sítios com diferentes condições de dominância vertical no estado de Rondônia, Amazônia brasileira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da base de dados

As informações biométricas utilizadas neste estudo foram provenientes do Inventário Florestal Nacional, coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro, e disponibilizadas gratuitamente pelo Sistema Nacional de Informações Florestais (SFB, 2024). A amostragem contemplou 26 municípios do estado de Rondônia, assim discriminados: Alta Floresta D'Oeste, Ariquemes, Buritis, Cacoal, Candeias do Jamari, Chupinguaia, Corumbiara, Costa Marques, Cujubim, Governador Jorge Teixeira, Itapuã do Oeste, Jaru, Machadinho D'Oeste, Ministro Andreazza, Nova Mamoré, Ouro Preto do Oeste, Parecis, Pimenta Bueno, Pimenteiras do Oeste, Porto Velho, Rio Crespo, São Francisco do Guaporé, Seringueiras, Theobroma, Vale do Anari e Vale do Paraíso.

O inventário consistiu na distribuição de 96 conglomerados com quatro subunidades retangulares (20×100 m) 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 50 m. Todos os fustes com diâmetro a 1,30 m de altura do solo (DAP, cm) igual ou superior a 10,0 cm foram mensurados usando fita diamétrica. A altura total dos fustes (H, m), distância linear do nível do solo ao ápice da copa, foi tomada com auxílio de vara graduada. A altura dominante foi definida como a média da altura de 20% das árvores mais altas por hectare (LOETSCH *et al.*, 1973). A distribuição de altura total no estrato vertical dominante dos conglomerados foi representada por boxplot.

2.2 Distribuição diamétrica por conglomerado

Os dados de diâmetro foram submetidos a análises descritivas (média, desvio padrão, mínimo, máximo e, pelo método dos momentos, assimetria e curtose) e agrupados em classes biométricas com intervalos regulares de 5 cm. Para a modelagem da distribuição dos diâmetros em cada conglomerado, foram testadas as seguintes funções: Weibull de 2 parâmetros (Weibull 2P), Logística de 2 parâmetros (Logística 2P), Normal e Log-normal (Tabela 1). Essas funções

foram selecionadas por meio de análise exploratória e foram as únicas que se ajustaram a distribuição diamétrica de todas as unidades amostrais. Todas as funções foram ajustadas pelo método da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo de otimização de Nelder e Mead.

Tabela 1- Funções de densidade probabilística testadas para a modelagem da distribuição diamétrica em conglomerados localizados na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.

Nome	Função de densidade probabilística
Weibull 2P	$f(x) = \left(\frac{\gamma}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\gamma}$
Logística 2P	$f(x) = \frac{e^{\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}}{\beta \left[1 + e^{\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}\right]^2}$
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$

x = centro de classe biométrica, $x \geq 0$; α = parâmetro de locação, $\alpha > 0$; β = parâmetro de escala, $\beta > 0$; γ = parâmetro de forma, $\gamma > 0$; μ = média (parâmetro locação); σ = desvio padrão (parâmetro escala); e = constante neperiana; e $\pi = 3,14159265359...$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.3 Redistribuição teórica de diâmetros

A redistribuição teórica de diâmetros foi baseada no estabelecimento de relações funcionais entre os parâmetros das funções de densidade probabilística e a altura dominante correspondente a cada conglomerado. O modelo de regressão logístico de três parâmetros foi ajustado pelo procedimento iterativo de Levenberg-Marquardt para a estimativa de cada um dos parâmetros das funções. Esse modelo também foi ajustado para a predição do diâmetro máximo em relação à altura dominante.

Modelo Logístico:

$$Y = \frac{\phi_0}{1 + \phi_1 e^{-\phi_2 H d}} + \varepsilon$$

Onde Y = variável dependente (parâmetros fdp e máximo DAP); H_d = altura dominante (m); \emptyset_0 , \emptyset_1 e \emptyset_2 = coeficientes do modelo logístico; e = constante neperiana; e ε = erro aleatório.

A qualidade de ajuste das redistribuições teóricas de diâmetro foi avaliada de acordo com os valores da Média dos Desvios Absolutos, Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$). Baixos valores de MDA e RQEM, além de altos valores de $r_{Y\hat{Y}}$, implicam em melhor qualidade preditiva. A aderência dessas redistribuições estimadas às distribuições observadas nos conglomerados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (GIBBONS; SUBHABRATA, 1992). Esse teste compara as frequências acumuladas estimadas com as observadas, sendo o ponto de maior divergência entre as distribuições o valor da estatística de teste (“dn”). A análise descritiva dessa estatística de teste incluiu a média, desvio padrão, os valores mínimo e máximo, além do percentual de conglomerados em que as redistribuições teóricas demonstraram aderência às distribuições observadas de diâmetro.

A função de densidade probabilística com maior acurácia na estimativa redistribuição de diâmetros foi selecionada para as análises gráficas subsequentes. Essas análises consideraram os valores observados e estimados de seus parâmetros, além da inspeção da superfície de resposta da estimativa de distribuição diamétrica para diferentes alturas dominantes. A superfície de resposta da frequência relativa foi truncada à direita no diâmetro máximo estimado em função da altura dominante do sítio.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foi considerado o nível de significância de 1% de probabilidade. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.5.0 (R CORE TEAM, 2025), por meio dos pacotes “fitdistrplus” (DELIGNETTE-MULLER; DUTANG, 2015), “investr” (GREENWELL; KABBAN, 2014), “Metrics” (HAMNER; FRASCO, 2018), “minpack.lm” (ELZHOV *et al.* 2023) e “stats” (R CORE TEAM, 2025).

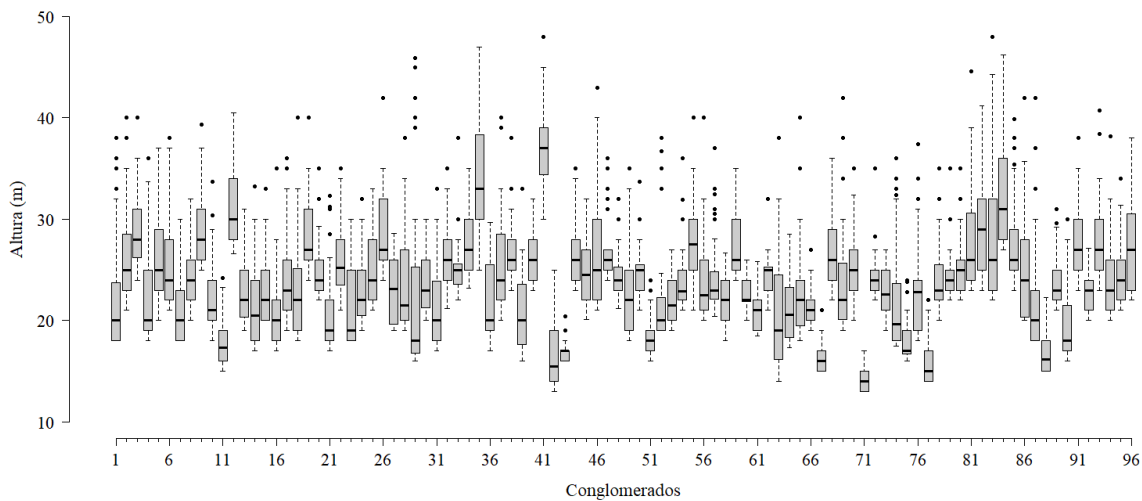
3. RESULTADOS

O inventário florestal amostrou 21.125 fustes, com DAP variando de 10,0 a 198,5 cm. As distribuições dos diâmetros nos conglomerados apresentaram assimetria positiva (média de 2,4275 e desvio padrão de 0,8030) e curtose leptocúrtica (média de 1,5256 e desvio padrão de 7,3618).

A altura total das árvores contidas no estrato vertical dominante dos conglomerados oscilou de 14,42 a 36,96 m (Figura 1). O boxplot evidenciou diferenças desse estrato vertical

entre conglomerados. A amplitude de variação de 20% das árvores mais altas foi de 4 a 31,5 m. Observou-se correlação positiva entre a amplitude dessa variação e a altura dominante dos conglomerados ($r = 0,4333$, $p \leq 0,01$).

Figura 1- Boxplot de altura total do estrato vertical dominante em conglomerados localizados na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Foram estabelecidas oito relações funcionais para a redistribuição teórica de diâmetros por classes de tamanho, com base no modelo de regressão logístico de três parâmetros (Tabela 2). Em média, a utilização da altura dominante como variável preditora proporcionou maior precisão na estimativa dos parâmetros das funções Weibull 2P e Log-normal 2P, demonstrada pelos menores valores, em média, de MDA e RQEM, além de maiores coeficientes de correlação entre frequências estimadas e observadas. Apesar de que ambas as funções tenham mostrado esse desempenho preditivo, a estimativa dos parâmetros Weibull 2P resultaram em menores valores da estatística de teste “dn” ($dn = 0,4947 \pm 0,0680$) e maior percentual de conglomerados cujas redistribuições teóricas se aderiram às distribuições observadas de diâmetro (Tabela 3), conforme avaliado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,01$).

Tabela 2- Coeficientes e qualidade de ajuste do modelo logístico para a estimativa do diâmetro máximo (DAP máx., cm) e dos parâmetros de funções de densidade probabilística, utilizando a altura dominante (m) como variável preditora, aplicados à região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.

Atributos	ϕ_0	ϕ_1	ϕ_2	MDA	RQEM	$r_{Y\hat{Y}}$
----- Weibull 2P -----						
Forma	1,7101	-137,1317	0,3775	0,1652	0,2179	0,7930*
Escala	30,0854	4,2524	0,1338	1,5081	2,0193	0,6947*
----- Logística 2P -----						
Locação	23,4369	2,7791	0,1158	1,1009	1,4720	0,6631*
Escala	9,0156	21,0701	0,1743	0,8681	1,1373	0,6791*
----- Normal -----						
Media	27,0673	3,7247	0,1232	1,3366	1,7865	0,6949*
DP	19,7307	23,6484	0,1773	2,1050	2,5799	0,6767*
----- Log-normal -----						
Media	3,0954	0,8392	0,1274	0,0471	0,0639	0,6887*
DP	0,5453	17,2916	0,2112	0,0371	0,0484	0,6874*
DAP máx.	147,2518	26,8847	0,1761	23,7371	28,0369	0,5450*

ϕ_0 , ϕ_1 e ϕ_2 = coeficientes do modelo logístico; RQEM = raiz quadrada do erro médio; MDA = média dos desvios absolutos; e $r_{Y\hat{Y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson; DP = desvio padrão; * significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Tabela 3- Estatística descritiva do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov calculadas para as redistribuições teóricas de diâmetro estimadas em sítios com diferentes alturas dominantes na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil.

Estatísticas	Weibull 2P	Logística 2P	Normal	Log-normal
----- dn -----				
Média	0,4947	0,5479	0,5175	0,9957
Desvio padrão	0,0680	0,0597	0,0724	0,0305
Mínimo	0,3333	0,4000	0,3333	0,7500
Máximo	0,6667	0,7500	0,7500	1,0000
----- % -----				

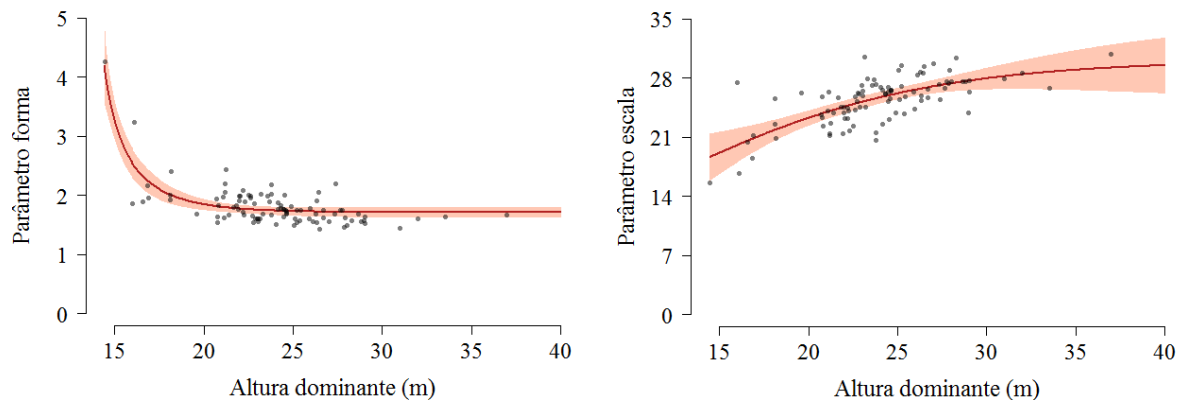
Aderência	91,6667	68,7500	88,5417	2,0833
-----------	---------	---------	---------	--------

“dn” = estatística de teste Kolmogorov-Smirnov; Aderência = percentual de conglomerados cujas redistribuições teóricas se aderiram às distribuições observadas de diâmetro a 1% de significância pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A redistribuição teórica de diâmetros por classes de tamanho, que utilizou a altura dominante como variável preditora dos parâmetros da função Weibull 2P, foi a mais acurada (Tabelas 2 e 3), sendo essa abordagem selecionada para as análises gráficas subsequentes. O padrão de crescimento sigmoidal, em forma de S, foi observado nas curvas dos parâmetros de forma e escala da função (Figura 2). A estimativa do parâmetro de forma diminuiu assintoticamente com o aumento da altura dominante, estabilizando-se no valor de 1,7101. Já o parâmetro de escala aumentou até atingir a assíntota de 30,0854.

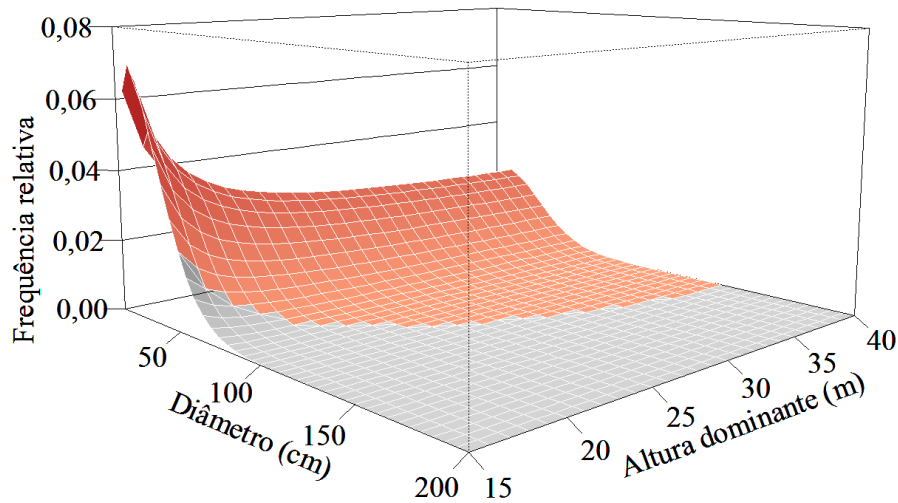
Figura 2-Representação gráfica da estimativa dos parâmetros da função Weibull 2P para diferentes alturas dominantes em conglomerados localizados na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil. Vermelho claro representa as margens de confiança ($1 - \alpha = 0,99$).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O padrão exponencial negativo (forma de "J invertido"), indicando maior concentração de fustes nas menores classes de tamanho, foi mais pronunciado em sítios com menores alturas dominantes (Figura 3). Em contrapartida, esse comportamento tornou-se mais suave em sítios caracterizados por maiores alturas dominantes. A superfície de resposta gerada a partir da estimativa dos parâmetros da função Weibull 2P elucidou o truncamento da distribuição, limitado pelo máximo valor de DAP, que exibiu tendência de aumento com a altura dominante ($r = 0,5208$, $p \leq 0,01$).

Figura 3-Superfície de resposta da frequência relativa de fustes, calculada a partir da redistribuição teórica de diâmetros com base nos parâmetros da função Weibull 2P, estimada a partir de informações de altura dominante na região amazônica do estado de Rondônia, Brasil. A superfície em vermelho delimita o espaço definido pela estimativa do diâmetro máximo, calculada a partir do intervalo inventariado de altura dominante.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4. DISCUSSÃO

A identificação de sítios com maior dominância vertical e ampla dispersão diamétrica é fundamental para definir zonas prioritárias de conservação, manejo sustentável e incremento da produção madeireira com base em critérios silviculturais. Esse zoneamento orienta as intervenções para áreas mais produtivas e de alto valor ecológico, otimiza a aplicação de recursos e viabiliza a adoção de estratégias específicas para regeneração, exploração e monitoramento, promovendo a sustentabilidade e a preservação funcional das florestas.

As dispersões de diâmetro (amplitude de 188,5 cm) e altura dominante (amplitude de 22,54 m) da vegetação amostrada na Amazônia rondoniense evidenciaram a ampla diversidade estrutural entre os conglomerados, sistematicamente distribuídos em sítios com distintas produtividades (Figura 1 e Tabela 2). Essa heterogeneidade estrutural é provavelmente consequência da complexa interação entre processos sucessionais, variabilidade genética e condições ambientais próprias de florestas tropicais (GARATE-QUISPE *et al.*, 2024; LI *et al.*,

2025; MARTORANO *et al.*, 2025; MORAIS *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2025; RODRÍGUEZ-LEÓN *et al.*, 2025; SHIMABUKURO *et al.*, 2025; SONTAG *et al.*, 2025).

A tendência de aumento da altura dominante acompanhada pela maior amplitude de variação das 20% árvores mais altas ($r = 0,4333$, $p \leq 0,01$) expressou diferenciação mais acentuada do estrato vertical superior em sítios mais produtivos. Esse padrão reflete a intensificação da competição por radiação luminosa, especialmente entre indivíduos dominantes, e aponta para a coexistência de espécies com estratégias ecológicas contrastantes de crescimento e ocupação do dossel (COELHO-SILVA *et al.*, 2024; COSTA *et al.*, 2025; MATSUO *et al.*, 2024).

A escolha adequada da função de densidade probabilística para modelar a distribuição diamétrica por conglomerado foi essencial para representar com precisão a redistribuição teórica de diâmetros a partir da altura dominante (Tabelas 2 e 3). A flexibilidade da função Weibull 2P em representar fenômenos de diferentes assimetrias (ALKAN *et al.*, 2025; BAILEY; DELL, 1973; PENIDO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019), foi corroborada pela qualidade preditiva das distribuições de diâmetro observadas nos sítios em estudo.

A aplicação dos parâmetros redistribuídos da função Weibull 2P, com base no modelo de regressão logístico de três parâmetros, implicou em predomínio de aderência às distribuições observadas de diâmetro em cada conglomerado (92%; Tabela 3) pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,01$). Isso possui grande relevância prática para a redução do esforço amostral para a caracterização da estrutura diamétrica e o planejamento do manejo florestal, uma vez que estimativas hipsométricas podem ser obtidas de forma eficiente por meio de tecnologias de sensoriamento remoto, como LiDAR e fotogrametria, já aplicadas em estudos na Amazônia (COSTA *et al.*, 2025; D'OLIVEIRA *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2025; WINSTANLEY *et al.*, 2024)

A especificação correta de variáveis nos modelos de redistribuição teórica de diâmetros requer uma criteriosa análise estatística e coerência biológica das estimativas de frequência. O comportamento decrescente do parâmetro forma da função Weibull 2P com o aumento da altura dominante indicou uma assimetria progressivamente mais positiva, tendendo à estabilização (Figura 2), em resposta a maior dominância vertical dos sítios. A intensificação da assimetria com a redução do parâmetro forma dessa função também foi verificada por BAILEY e DELL (1973). Distribuições com cauda à direita retratam maior concentração de fustes em classes de menor diâmetro, com diminuição gradual da frequência em classes superiores, padrão característico de florestas naturais sem perturbações intensivas (LAFETÁ *et al.*, 2024). Esse padrão estrutural em J-invertido está relacionado à regeneração contínua e à

coexistência de múltiplas classes etárias, denotando uma dinâmica populacional ativa e com indivíduos de diferentes estágios de desenvolvimento competindo por recursos de crescimento e espaço (GILES *et al.*, 2024; PINTO *et al.*, 2025; REIS *et al.*, 2018; RODRIGO *et al.*, 2024).

Espera-se pouca variação na assimetria da distribuição diamétrica em sítios com altura dominante superior a 32,98 m, correspondente à assíntota de 1,7101 do parâmetro de forma da função Weibull-2P. Essa estabilidade estrutural favorece o planejamento de intervenções silviculturais, o monitoramento da dinâmica de crescimento ao longo do tempo e o emprego de estratégias mais seguras para o uso responsável dos recursos (BASSIL *et al.*, 2019). Sítios com esse perfil produtivo viabilizam a implementação de regimes de colheita seletiva mais bem definidos, com ciclos de corte e intensidade de exploração planejada para preservar a integridade estrutural do povoamento e evitar a remoção excessiva em classes específicas de tamanho.

Eventuais colheitas seletivas de materiais lenhosos devem ser vistas com bastante cautela e realizada de forma racional, seguindo a legislação ambiental vigente. A orientação técnica/profissional apropriada é indispensável para conciliar a conservação de fragmentos com a geração de renda para pequenos e grandes produtores rurais. O planejamento do manejo florestal deve ser ajustado segundo o estágio de desenvolvimento da floresta, a intensidade da competição entre os indivíduos e os objetivos de sustentabilidade da produção.

Os maiores valores do parâmetro escala por sua vez, observados nos sítios mais produtivos, culminaram em uma distribuição mais equilibrada entre as classes de diâmetro (Figuras 2 e 3). Salienta-se que a ocorrência de fustes com maiores dimensões é um indicio de estágio avançado de desenvolvimento da floresta e uma estrutura dimensional mais diversificada (MURALI *et al.*, 2025; VALENTE *et al.*, 2025). Nesses casos, o manejo sustentável deve priorizar práticas que também estimulem a regeneração natural e a manutenção da diversidade etária, assegurando a produção contínua do estoque de madeira de maior valor comercial.

Em sítios onde predominam fustes de menor porte em relação às classes de maior diâmetro, cenário comum de florestas em estágios juvenis ou em processo de regeneração, o volume de madeira disponível para extração imediata é reduzido. No entanto, esses indivíduos representam o potencial de crescimento futuro, desde que as condições do sítio e a dinâmica de competição favoreçam seu desenvolvimento. Nesses casos, intervenções silviculturais de liberação podem reduzir a competição entre árvores vizinhas, promover o crescimento dos indivíduos de interesse ecológico e/ou comercial e aumentar a incidência de radiação solar no sub-bosque, estimulando a regeneração natural.

Embora a redistribuição teórica de diâmetros seja prevalentemente mais difundida a povoamentos equiâneos (ALKAN *et al.*, 2025; CAMPOS; LEITE, 2017; PENIDO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019), sua aplicação em florestas naturais demonstrou-se eficaz para representar a estrutura diamétrica de sítios com diferentes dominâncias verticais, mesmo diante da complexidade estrutural e da ausência de uniformidade etária. O uso da altura dominante como variável explicativa para a estimativa dos parâmetros de funções de densidade probabilística mostrou-se uma ferramenta estatística promissora para discriminar distribuições diamétricas associadas a diferentes condições de sítio florestal.

Os resultados obtidos fornecem subsídios para o desenvolvimento de pesquisas subsequentes relacionadas à mensuração de ecossistemas naturais e manejo florestal sustentável. A estrutura florestal heterogênea encontrada reforça a necessidade de abordagens que considerem essa variabilidade na modelagem e no planejamento do manejo, sobretudo em regiões tropicais ricas em biodiversidade como a Amazônia.

5. CONCLUSÕES

O modelo Logístico de três parâmetros é eficiente para redistribuir teoricamente os diâmetros em sítios com diferentes dominâncias verticais do bioma Amazônico no estado de Rondônia, proporcionando estimativas precisas dos parâmetros da função de densidade probabilística Weibull-2P.

O uso da altura dominante, obtida pela média das alturas dos 20% dos indivíduos mais altos por hectare, como variável preditora mostra-se uma alternativa promissora para a modelagem da redistribuição teórica de diâmetros aplicada a florestas naturais.

Sítios com maior dominância vertical e mais diversos estruturalmente tendem a exibir distribuições diâmetricas com cauda mais pronunciada à direita.

A metodologia proposta, integrada com a coleta de dados hipsométricos via sensoriamento remoto, pode reduzir o esforço amostral e fornecer estimativas precisas da estrutura diamétrica florestal.

REFERÊNCIAS

- ALKAN, O.; CAO, Q. V.; ÖZÇELİK, R. Characterizing diameter distribution of *Pinus nigra* stands in Türkiye with a Weibull distribution. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 55, n. 2, p. 1-12, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0139>. Acesso em: 30 set. 2025.
- BAILEY, R. L.; DELL, T. T. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/forestsience/19.2.97>. Acesso em: 30 set. 2025.
- BASSIL, S. *et al.* Dynamics of the diameter distribution after selection cutting in uneven- and even-aged northern hardwood stands: a long-term evaluation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 12, p. 1525-1539, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0204>. Acesso em: 30 set. 2025.
- BRIGANTE, R. *et al.* Gis-based approach for estimating olive tree heights using high-resolution satellite imagery and shadow analysis. **Applied Sciences**, 2025, 15, 3066, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15063066>. Acesso em: 30 set. 2025.
- CAMPOS, J. C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV. 2017. 636p.
- CASAS, G. G. *et al.* Quantifying solid volume of stacked eucalypt timber using detection-segmentation and diameter distribution models. **Smart Agricultural Technology**, v. 9, 100653, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100653>. Acesso em: 30 set. 2025.
- CLUTTER, J. L.; BENNETT, F. A. Diameter distributions in old-field slash pine plantations. **Georgia Forest Research Council**, p. 1-9, 1965.
- COELHO-SILVA, D. *et al.* Hydraulic and structural traits of trees across light gradients in the Amazon secondary forest. **Tree Physiology**, v. 44, n. 12, tpae146, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpae146>. Acesso em: 30 set. 2025.
- COSTA, F. F. *et al.* Terrestrial LiDAR technology to evaluate the vertical structure of stands of *Bertholletia excelsa* Bonpl., a species symbol of conservation through sustainable use in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 17, n. 13, 6049, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17136049>. Acesso em: 30 set. 2025.
- D'OLIVEIRA, M. V. N. *et al.* Impacts of selective logging on Amazon forest canopy structure and biomass with a LiDAR and photogrammetric survey sequence. **Forest Ecology and Management**, v. 500, 119648, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119648>. Acesso em: 30 set. 2025.
- DELIGNETTE-MULLER, M. L.; DUTANG, C. fitdistrplus: an R package for fitting distributions. **Journal of Statistical Software**, v. 64, n. 4, p. 1-34, 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v064.i04>. Acesso em: 30 set. 2025.

ELZHOV, T. V. *et al.* Interface to the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm Found in MINPACK, plus support for bounds. 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/minpack.lm.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

FERNANDES, M. M. *et al.* Using DAP-RPA point cloud-derived metrics to monitor restored tropical forests. **Forests**, v. 16, n. 7, 1092, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f16071092>. Acesso em: 30 set. 2025.

GARATE-QUISPE, J. *et al.* Changes in floristic and vegetation structure in a chronosequence of abandoned gold-mining lands in a tropical Amazon forest. **Heliyon**, v. 10, e29908, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29908>. Acesso em: 30 set. 2025.

GIBBONS, J. D.; SUBHABRATA, C. **Nonparametric statistical inference**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1992. 544p.

GILES, A. L. *et al.* Simple ecological indicators benchmark regeneration success of Amazonian forests. **Communications Earth & Environment**, v. 5, 780, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01949-9>. Acesso em: 30 set. 2025.

GREENWELL, B. M.; KABBAN, C. M. S. *investr*: an R package for inverse estimation. **The R Journal**, v. 6, n. 1, p. 90-100, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.32614/RJ-2014-009>. Acesso em: 30 set. 2025.

HAMNER, B.; FRASCO, M. *Metrics*: evaluation metrics for machine learning. 2018. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/Metrics/Metrics.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

LAFETÁ, B. O. *et al.* Modeling of hypsometric distribution of *Handroanthus heptaphyllus* seedlings in different containers. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 37, p. 1915-1923, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13286>. Acesso em: 30 set. 2025.

LAFETÁ, B. O. *et al.* Diametric growth and time passage in Atlantic Forest fragment under forest recovery. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 23, n. 3, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811712332024483>. Acesso em: 30 set. 2025.

LAFETÁ, B. O. *et al.* Modelagem morfométrica de *Licania tomentosa* (Benth.) por regressão logística e máquinas vetor de suporte. **Scientia Plena**, v. 16, 060206, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.060206>. Acesso em: 30 set. 2025.

LI, C. *et al.* Mapping the Cerrado-Amazon transition using PlanetScope-Sentinel data fusion and a U-net deep learning framework. **Remote Sensing**, v. 17, n. 13, 2138, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17132138>. Acesso em: 30 set. 2025.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest Inventory**. 2. ed. Munich: [s.n.], 1973. 469p.

MARTORANO, L. G. *et al.* A methodological proposal for topoclimatic zoning of native forest species in the Brazilian Amazon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 156, 249, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05478-z>. Acesso em: 30 set. 2025.

- MATSUO, T. *et al.* Light competition drives species replacement during secondary tropical forest succession. **Oecologia**, v. 205, p. 1-11, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00442-024-05551-w>. Acesso em: 30 set. 2025.
- MORAIS, I. L. L. *et al.* Climate change impact on the distribution of forest species in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 16, n. 8, 3458, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16083458>. Acesso em: 30 set. 2025.
- MURALI, A. *et al.* Structure and dynamics of secondary and mature rainforests: insights from South Asian long-term monitoring plots. **Plant Ecology & Diversity**, v. 18, n. 1-2, p. 55-67, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17550874.2025.2494204>. Acesso em: 30 set. 2025.
- OGANA, F. N.; GREEN, P. C.; RADTKE, P. Modeling the growth and yield of natural hardwood stands in the southern United States using the forest inventory and analysis data. **Forest Ecology and Management**, v. 586, 122722, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122722>. Acesso em: 30 set. 2025.
- OLIVEIRA, A. H. M. *et al.* Monitoring sustainable forest management plans in the Amazon: Integrating LiDAR data and PlanetScope imagery. **Remote Sensing Applications**, v. 38, 101535, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101535>. Acesso em: 30 set. 2025.
- OLIVEIRA, P. V. C.; ZHANG, H. K.; ZHANG, X. Estimating Brazilian Amazon canopy height using Landsat reflectance products in a Random Forest model with LiDAR as reference data. **Remote Sensing**, v. 16, n. 16, 2571, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16142571>. Acesso em: 30 set. 2025.
- ÖZÇELİK, R. *et al.* Characterization of the variability of the diameter distribution of natural Taurus cedar stands in Türkiye using Johnson's SB distribution. **Cerne**, v. 29, e103265, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760202329013265>. Acesso em: 30 set. 2025.
- PENIDO, T. M. A. *et al.* Growth and production models for volumetric estimates in commercial eucalypt stands. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3340, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.06>. Acesso em: 30 set. 2025.
- PINTO, R. C. *et al.* Natural regeneration responses of tree species at the end of the first timber harvesting cycle in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, 594, 122947, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122947>. Acesso em: 30 set. 2025.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2025.
- REIS, L. P. *et al.* Estimation of mortality and survival of individual trees after harvesting wood using artificial neural networks in the amazon rain forest. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 140-147, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.014>. Acesso em: 30 set. 2025.
- RODRIGO, R. M. *et al.* Past disturbances shape present tree size distribution in European temperate primary beech-dominated forests. **Forest Ecology and Management**, v. 574,

122364, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122364>. Acesso em: 30 set. 2025.

RODRÍGUEZ-LEÓN, C. H. *et al.* Forest attribute dynamics in secondary forests: Insights for advancing ecological restoration and transformative territorial management in the Amazon. **Diversity**, v. 17, n. 1, 39, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d17010039>. Acesso em: 30 set. 2025.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. Sistema nacional de informações florestais. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/inventario-florestal-nacional-ifn>. Acesso em: 30 set. 2025.

SHIMABUKURO, Y. E. *et al.* Monitoring annual Landsat-based deforestation using LSMM and MODIS-burned area product in Rondônia, Brazilian Amazon. **Discover Conservation**, v. 2, 21, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44353-025-00037-z>. Acesso em: 30 set. 2025.

SONTAG, V. E. *et al.* Maintaining genetic diversity in the Amazon: species-specific strategies are more effective for managed forests than generalist criteria in Brazilian legislation. **Forest Ecology and Management**, v. 584, 122568, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122568>. Acesso em: 30 set. 2025.

STEPKA, T. F. *et al.* How are diameter growth, forest structure and carrying capacity related in tree populations? **Ecological Modelling**, v. 506, 111141, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111141>. Acesso em: 30 set. 2025.

VALENTE, C. *et al.* Assessing forest succession along environment, trait, and composition gradients in the Brazilian Atlantic Forest. **Forests**, v. 16, n. 7, p. 1169, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f16071169>. Acesso em: 30 set. 2025.

WINSTANLEY, P. *et al.* Post-logging canopy gap dynamics and forest regeneration assessed using airborne lidar time series in the Brazilian Amazon with attribution to gap types and origins. **Remote Sensing**, v. 16, 2319, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16132319>. Acesso em: 30 set. 2025.

ZHANG, Z. *et al.* Prediction of diameter distributions with multimodal models using LiDAR data in subtropical planted forests. **Forests**, v. 10, n. 2, 125, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f10020125>. Acesso em: 30 set. 2025.