

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Distribuição espacial de erros de estimativas dendrométricas com laser
escâner portátil em povoamentos de eucalipto**

Mikaely Vasconcelos Paulo
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

MIKAELY VASCONCELOS PAULO

**Distribuição espacial de erros de estimativas dendrométricas com laser
escâner portátil em povoamentos de eucalipto**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Diogo Nepomuceno Cosenza

Coorientadores: Carlos P. B. Soares
Nerilson Terra Santos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P331d
2026 Paulo, Mikaely Vasconcelos, 1999-
Distribuição espacial de erros de estimativas
dendrométricas com laser escaner portátil em povoamentos de
eucalipto / Mikaely Vasconcelos Paulo. – Viçosa, MG, 2026.
1 dissertação eletrônica (31 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Diogo Nepomuceno Cosenza.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2026.

Referências bibliográficas: f. 29-31.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.247>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Levantamentos florestais - Mapas por sensoriamento
remoto. 2. Eucalipto - Cultivo - Mapas por sensoriamento
remoto. 3. Radar óptico. 4. Análise espacial (Estatística).
I. Cosenza, Diogo Nepomuceno, 1989-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.95246

MIKAELY VASCONCELOS PAULO

**Distribuição espacial de erros de estimativas dendrométricas com laser
escâner portátil em povoamentos de eucalipto**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Mikaely Vasconcelos Paulo
Autora

Diogo Nepomuceno Cosenza
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 21/05/2026 às 19:15:17 e pelo orientador em 29/05/2026 às 14:53:36. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **MW29.ZMOS.Q6GL** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elci e Ana, pelo amor, apoio e por todo suporte dedicado a mim durante todos esses anos de formação acadêmica, vocês são a base de tudo o que conquistei. À minha irmã, Elciany, pela amizade e pelo apoio constante em todas as fases desta caminhada.

Ao meu parceiro de vida, Thiago, pelo amor, compreensão e pela paciência infinita, sendo meu porto seguro ao longo de toda esta jornada.

Aos amigos do laboratório que fizeram parte dessa trajetória, compartilhando desafios e conquistas, em especial à Amanda, pelo apoio e momentos que tornaram esse percurso mais leve e significativo.

Ao meu orientador, Diogo, pela parceria, pelos ensinamentos, por todas as oportunidades concedidas e pela confiança depositada em meu trabalho.

Ao meu coorientador, Nerilson, pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho, pelas orientações precisas e pela disponibilidade constante. Ao Carlos Pedro, pela acolhida e pela oportunidade que me concedeu ao me aceitar como orientada no início desta trajetória.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pelo suporte acadêmico, financeiro e institucional oferecido ao longo do curso. Tenho imenso orgulho de ter feito parte desta instituição tão renomada e de excelência.

À Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPPI) – Unidade Fibras Florestais, pela concessão da bolsa de estudos.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

*Há mundos inteiros escondidos;
no olhar atento, eles se revelam.*

RESUMO

PAULO, Mikaely Vasconcelos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Distribuição espacial de erros de estimativas dendrométricas com laser escâner portátil em povoamentos de eucalipto**. Orientador: Diogo Nepomuceno Cosenza. Coorientadores: Carlos Pedro Boechat Soares e Nerilson Terra Santos.

O personal laser scanning (PLS) destaca-se como uma ferramenta promissora para inventários florestais aprimorados devido à sua flexibilidade operacional e rapidez na aquisição de dados. No entanto, ainda não há um consenso quanto às estratégias ideais de coleta em campo, especialmente no que se refere à influência da geometria de aquisição e da distância sensor-alvo na propagação espacial dos erros de estimativa em sistemas baseados em simultaneous localization and mapping (SLAM). Este estudo avalia o comportamento espacial dos erros de estimativa de variáveis dendrométricas derivadas de dados de PLS adquiridos sob uma configuração estática em florestas plantadas de eucalipto. Os resultados indicam um aumento sistemático dos erros na estimativa do diâmetro à altura do peito (*dap*) com o aumento da distância ao sensor, enquanto os erros associados à estimativa de altura total (*h*) apresentam menor sensibilidade a esse fator. Além disso, o estudo observa padrões espaciais de erro dependentes da geometria de aquisição, o que permite a identificação de distâncias críticas de medição. Os achados contribuem para o aprimoramento de protocolos de aquisição de dados com PLS e fornecem subsídios para o uso mais eficiente de sistemas baseados em SLAM em inventários florestais.

Palavras-chave: PLS; LiDAR; inventário florestal aprimorado ; povoamentos de eucalipto; distribuição espacial de erros

ABSTRACT

PAULO, Mikaely Vasconcelos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Spatial distribution of errors in the estimation of tree attributes with portable laser scanning in eucalyptus plantations.** Adviser: Diogo Nepomuceno Cosenza. Co-advisers: Carlos Pedro Boechat Soares and Nerilson Terra Santos.

Personal laser scanning (PLS) stands out as a promising tool for enhanced forest inventories due to its operational flexibility and rapid data acquisition. However, there is still no consensus regarding optimal field data collection strategies, particularly concerning the influence of acquisition geometry and sensor-target distance on the spatial propagation of estimation errors in systems based on simultaneous localization and mapping (SLAM). This study evaluates the spatial behavior of estimation errors in biometric variables derived from PLS data acquired under a static configuration in eucalyptus plantations. The results indicate a systematic increase in errors in diameter at breast height (*dbh*) estimation with increasing distance from the sensor, while errors associated with total height (*h*) estimation show lower sensitivity to this factor. In addition, the study identifies spatial error patterns that depend on acquisition geometry, enabling the identification of critical measurement distances. The findings contribute to the improvement of data acquisition protocols using PLS and provide support for the more efficient use of SLAM-based systems in forest inventories.

Keywords: PLS; LiDAR; enhanced forest inventories; eucalyptus plantations; spatial distribution of errors

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Objetivos.....	10
1.2. Hipóteses.....	10
2. METODOLOGIA.....	11
2.1. Área de estudo	11
2.2. Coleta de dados das árvores	11
2.3. Coleta de dados das árvores com PLS.....	12
2.4. Pré-processamento da nuvem de pontos	13
2.5. Análises	15
3. RESULTADOS	18
3.1. Eficiência de detecção e extração das variáveis dendrométricas.....	18
3.2. Distribuição dos resíduos das estimativas.....	18
3.3. Distribuição espacial da magnitude dos erros.....	21
3.4. Efeito da distância na magnitude e dispersão dos erros	23
4. DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÃO.....	28
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

As plantações de eucalipto no Brasil são povoamentos florestais equiâneos, de origem exótica, manejados intensivamente e implantados, em geral, com espaçamento regular para a produção industrial de madeira. Esses sistemas distinguem-se das florestas naturais tropicais por sua composição florística simplificada e de rápido crescimento, desempenhando papel relevante no fornecimento de matéria-prima para indústrias de transformação de base florestal. Em escala global, as florestas plantadas ocupam cerca de 312 milhões de hectares, correspondendo a aproximadamente 8% da área florestal mundial (FAO, 2025). No Brasil, as florestas plantadas ocupam aproximadamente 10,5 milhões de hectares, dos quais cerca de 8,1 milhões correspondem a plantações de eucalipto. Como um todo, esse setor desempenha papel central na economia florestal nacional, com exportações da ordem de US\$ 15,7 bilhões, receita bruta estimada em R\$ 240 bilhões e geração de cerca de 2,8 milhões de empregos (IBÁ, 2025).

Os dados do inventário florestal são a base para o planejamento estratégico e gestão sustentáveis dos recursos florestais, pois fornecem dados indispensáveis para a tomada de decisão em florestas plantadas (van Laar; Akça, 2007). Tradicionalmente, o inventário envolve a coleta de atributos como o diâmetro à altura do peito (*dap*), a altura total (*h*), a área basal, o volume e a densidade do povoamento, fundamentais para as estimativas de volume, biomassa e carbono, bem como para a modelagem do crescimento (Burkhart; Tomé, 2012). A medição em campo, no entanto, é uma tarefa onerosa por demandar muito tempo, especialmente em plantios com áreas extensas. Nesse contexto, as tecnologias baseadas em sensoriamento remoto têm sido uma alternativa promissora para otimizar a aquisição indireta dessas variáveis dendrométricas (Liang *et al.*, 2018).

O sensor remoto mais utilizado nas medições de árvores individuais é o *light detection and ranging* (LiDAR). Embora aplicações modernas de *terrestrial laser scanning* (TLS), utilizando sensores montados em tripé, tenham sido estabelecidas no início dos anos 2000 para estimar altura das árvores, diâmetro e estrutura do dossel (Hopkinson *et al.*, 2004; Lovell *et al.*, 2003), as origens experimentais do método remontam a 1976. Nesse trabalho inicial, pesquisadores soviéticos utilizaram lasers terrestres para traçar perfis da estrutura das árvores, marcando a primeira vez em que a mensuração de árvores foi o objetivo principal (Solodukhin *et al.*, 1976). Entre 2010 e 2012, o surgimento de sistemas inovadores de sensoriamento terrestre e de dispositivos mais portáteis ampliou significativamente as capacidades operacionais (Liang *et al.*, 2012).

A terminologia utilizada para esses sistemas permanece difusa na literatura, uma vez que os autores frequentemente empregam uma ampla variedade de termos para descrever a plataforma de transporte específica. O termo *mobile laser scanning* (MLS) para carros (Pires *et al.*, 2022), *portable laser scanning* (PLS) ou *handheld mobile laser scanning* (HMLS) para os de uso pessoal ou manual (Balenović *et al.*, 2021), ou *wearable laser scanning* (WLS), como os acoplados em mochilas, etc. (Cabo *et al.*, 2018). Este estudo concentra-se no PLS, explorando seu desempenho e aplicabilidade como uma ferramenta versátil para a coleta de dados florestais em alta resolução. Esses sistemas apresentam vantagens relacionadas à mobilidade da plataforma de aquisição, o que aumenta a flexibilidade operacional e facilita a coleta de dados em campo. Diferentemente dos sistemas TLS, que geralmente são implantados em configurações estáticas e requerem a instalação em tripés, o PLS permite a aquisição dinâmica de dados durante o deslocamento do operador. Essa característica é particularmente interessante em ambientes de difícil acesso, onde restrições logísticas podem limitar o transporte e a instalação de equipamentos estacionários.

Estudos recentes têm demonstrado o potencial do PLS na determinação de atributos dendrométricos. Cabo *et al.* (2018) observaram desempenho semelhante entre PLS e o TLS na estimativa do *dap* e na detecção de árvores individuais, com maior eficiência operacional do PLS. Chen *et al.* (2019) relataram alta taxa de detecção de troncos e estimativas confiáveis de *dap* e posição das árvores com PLS, enquanto Balenović *et al.* (2021) destacaram o bom desempenho do PLS na estimativa de diâmetro, com potencial também para a estimativa da altura total.

Equipamentos PLS geralmente não incluem um receptor GNSS (*global navigation satellite system*) para a geolocalização dos dados. Aqueles que não possuem tal receptor fornecem dados em coordenadas relativas, baseados em unidades de medição inercial (IMU) e processados por algoritmos de localização e mapeamento simultâneos (*simultaneous localization and mapping* — SLAM). SLAM é um algoritmo que permite ao sistema construir o mapa de um ambiente desconhecido enquanto, simultaneamente, estima sua própria trajetória dentro dele (Cadena *et al.*, 2016). Embora essa abordagem seja efetiva para a navegação em locais sem sinal de satélite, há a possibilidade de introdução de ruídos e erros de registro na nuvem de pontos (Chen *et al.*, 2019). No entanto, tal sistema tem sido amplamente utilizado em aplicações de PLS na silvicultura com alta precisão (Gollob; Ritter; Nothdurft, 2020; Tupinambá-Simões *et al.*, 2023).

Nesse contexto, ainda que existam estudos que avaliem o efeito da densidade de pontos e da trajetória de caminhada na estimativa de atributos florestais a partir dos dados de PLS,

ainda não há consenso quanto à estratégia ideal de coleta em campo. Em particular, a forma como os erros de estimativa se comporta espacialmente em sistemas baseados em SLAM, bem como sua relação com a geometria de aquisição e a distância entre o sensor e os alvos, permanece pouco compreendida. A compreensão desses efeitos é fundamental para a definição de distâncias críticas de medição e para o desenvolvimento de padrões mais efetivos de coleta de dados em inventários florestais.

1.1. Objetivos

Este estudo teve como objetivo investigar o comportamento espacial da magnitude do erro das estimativas de variáveis dendrométricas derivadas de dados de PLS em plantações comerciais de eucalipto no Brasil. Especificamente buscou-se:

- Identificar padrões de dependência espacial na magnitude dos erros das variáveis de diâmetro (dap) e altura total (h);
- Determinar os limites operacionais de distância entre o sensor e a árvore que assegurem a acurácia e integridade dos dados coletados sob o algoritmo SLAM.

1.2. Hipóteses

A condução deste estudo fundamentou-se na premissa de que a distribuição dos erros das estimativas de dap e h em sistemas PLS não é meramente aleatória. Define-se, portanto, como hipótese nula (H_0) que os erros das estimativas das variáveis dendrométricas distribuem-se de forma estocástica (aleatória) no espaço; em contrapartida, a hipótese alternativa (H_1) assume a existência de estruturas de dependência espacial, refutando a aleatoriedade pura em plantios comerciais. Para testar tais hipóteses com o rigor estatístico necessário, o estudo utilizou uma base de dados robusta composta por 30 parcelas experimentais (960 árvores), abrangendo três classes de idade e refletindo a real variabilidade estrutural de povoamentos de eucalipto no Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em povoamentos clonais de híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake localizados no entorno do município de Virginópolis (18°49'22" S, 42°42'14" O), estado de Minas Gerais. A área é caracterizada por clima do tipo Cwa, segundo a classificação climática de Köppen–Geiger (Peel; Finlayson; McMahon, 2007), com verões quentes e chuvosos e invernos secos. A região possui relevo ondulado, com altitude de aproximadamente 807 m, precipitação média anual de 1.410 mm, temperaturas médias de 20 °C.

À época de coleta dos dados os povoamentos eram conduzidos em regime de alto fuste, nos espaçamentos 3,0 x 3,0 m e 3,0 x 2,5 m. Uma vez que o plantio é destinado para produção de celulose, o povoamento é colhido em corte raso entre 5 e 8 anos. Como prática comum neste tipo de sistema, os talhões receberam tratamentos silviculturais intensivos, que incluem adubação de plantio e cobertura, controle de pragas e mato-competição.

2.2. Coleta de dados das árvores

A coleta dos dados dendrométricos ocorreu em março de 2024, ao final do verão. Por se tratar de plantios de eucalipto (florestas perenes), as medições foram realizadas com a copa plenamente folheada. Foram amostradas 30 parcelas de 20 x 15 m (300 m²), totalizando 960 árvores (~32 árvores por parcela). As parcelas pertenceram a uma rede parcelas permanentes distribuídas sistematicamente em 14 talhões para monitoramento anual do crescimento do povoamento. As idades dos talhões variaram entre 2 e 8 anos, sendo aqui agrupadas em três estágios de desenvolvimento: jovem (2-3 anos), intermediário (4-5 anos), e maduro (6-8 anos). O *dap* e a altura de todos os indivíduos foram mensurados com suta e hipsômetro Haglof EC II-D, respectivamente, seguindo um caminhamento em zigue-zague ao longo das linhas de plantio. A caracterização desses dados por estágio de desenvolvimento está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos dados por talhão e estágios de desenvolvimento

Estágio	Talhão	Idade (anos)	N° de parcelas	N° de árvores	<i>dap</i> (cm)			<i>h</i> (m)		
					Min	Med	Máx	Min	Med	Máx
Jovem	1	2	2	64	10,3	13,2	15,5	17,9	20,1	22,4
	2	2	2	70	9,2	13,2	15,3	16,3	21,5	23,2
	3	2	1	36	8,5	13,0	14,3	15,9	19,5	20,4
	4	3	3	107	5,6	13,7	17,4	10,2	20,9	24,3
	5	3	2	60	7,5	15,3	18,6	15,5	20,1	22,4
	Total		10	337	5,6	13,6	18,6	10,2	21,4	28,0
Intermediário	6	4	2	48	14,1	18,0	20,7	25,5	28,1	30,6
	7	4	3	94	11,7	15,1	19,4	21,8	27,3	30,4
	8	5	4	120	8,5	17,2	21,1	18,9	29,7	34,2
	9	5	1	34	10,9	18,0	22,6	20,7	31,8	36,2
	Total		10	296	8,5	16,8	22,6	18,9	28,9	36,2
Maduro	10	6	3	106	7,5	16,2	21,7	15,2	29,3	35,2
	11	6	2	64	7,1	15,4	19,9	14,4	26,4	30,6
	12	8	2	59	7,2	18,2	25,2	15,5	33,3	41,6
	13	8	2	66	11,9	17,3	21,5	23,0	32,0	36,7
	14	8	1	32	13,3	18,7	22,1	25,4	32,8	36,5
	Total		10	327	7,1	16,9	25,2	14,4	30,3	41,6
	Total		30	960	5,6	15,7	25,2	10,2	26,8	41,6

dap = diâmetro com casca, a 1,30m de altura; *h* = altura total da árvore; Min. = mínimo; Med.= média; Max. = máximo.

2.3. Coleta de dados das árvores com PLS

A coleta das nuvens de pontos nas parcelas foi realizada com o sensor GeoSLAM Zeb-Horizon, modelo GS510254. O sensor tem uma taxa de repetição de 300.000 pulsos s⁻¹, alcance máximo de 100 metros, divergência do feixe de 3 mrad, precisão relativa de 1-3 cm, campo de visão com 360° horizontal e 270° vertical, e resolução angular de 0,1°-0,4°. Este equipamento não inclui receptor de GNSS, de modo que as posições dos pontos são registradas num sistema de coordenadas cartesiana relativa, partindo da posição de início do sistema. Para que estes pontos fossem geoposicionados, seria necessário o registro do ponto inicial com um receptor GNSS de precisão, entretanto essa etapa não foi necessária neste trabalho.

Os dados do PLS foram adquiridos em uma abordagem estática, com o sensor mantido fixo na mão do operador durante todo o período de escaneamento. Ao suprimir o componente de movimento, foi possível avaliar apenas as incertezas associadas ao sensor e à geometria de aquisição, permitindo uma análise mais direta desses padrões. O procedimento de

escaneamento estático consistiu no posicionamento do sensor em um dos vértices da parcela, aproximadamente a 3 m da primeira árvore medida no inventário florestal, mantendo-o a aproximadamente 1,30 m acima do nível do solo e orientado em direção ao centro da parcela por um período de 30 s (Figura 1a). Embora o fabricante recomende um período mínimo estacionário de 15 s, tempos de aquisição mais longos (30 s) são comumente adotados para aumentar a densidade da nuvem de pontos. A associação entre as árvores na nuvem de pontos e aquelas registradas na ficha de campo foi realizada por meio de um croqui representando o arranjo espacial relativo dos indivíduos e a sequência de medição do inventário florestal tradicional, destacando a primeira árvore e a posição fixa do sensor (Figura 1b).

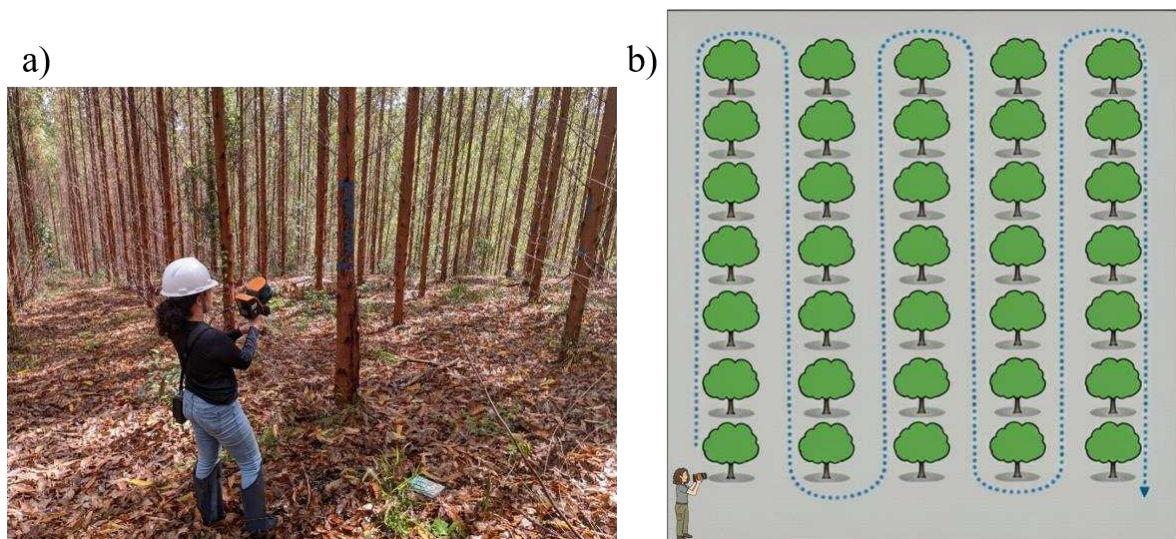


Figura 1 – a) Foto da varredura estática. (b) Exemplo do esboço utilizado para associar as posições das árvores às medições convencionais do inventário florestal; as linhas azuis indicam a direção das medições.

2.4. Pré-processamento da nuvem de pontos

O processamento inicial consistiu no recorte manual das nuvens de pontos brutas no CloudCompare (<https://cloudcompare.org/>). Utilizou-se o ponto de origem do escaneamento ($X=0$, $Y=0$) e o croqui de campo como referências espaciais para isolar visualmente cada parcela em relação à cena completa capturada pelo sensor, eliminando elementos externos à área de estudo. Em seguida, as nuvens recortadas de cada parcela foram processadas no ambiente R (R Core Team, 2025) com o pacote lidR (Roussel; Goodbody; Tompalski, 2024). O fluxo inclui a remoção de pontos duplicados e a filtragem de ruídos via algoritmo *Isolated Voxels Filter* (IVF, resolução de 3 m), seguida pela classificação do terreno pelo algoritmo *Cloth Simulation Filter* (CSF, rigidez = 3). Por fim, as alturas foram normalizadas em relação ao solo

por meio da triangulação dos pontos de terreno, resultando na representação real da estrutura da vegetação.

Devido à ausência de receptor GNSS integrado ao sistema PLS, cada parcela foi gerada originalmente em um sistema de coordenadas local independente, com origem no ponto inicial de varredura. Para viabilizar a análise espacial dos erros, realizou-se o georreferenciamento relativo das nuvens por meio de transformações de rotação e translação. A nuvem de pontos de uma das parcelas foi definida como referência espacial, e as demais foram alinhadas a essa referência buscando a melhor sobreposição geométrica no plano horizontal (XY). O ajuste no eixo vertical (Z) foi omitido propositalmente em função da declividade variável do terreno e por não interferir nas métricas planimétricas objetivadas na análise de erros.

Para mitigar incertezas decorrentes de falhas de omissão ou comissão comuns em algoritmos de segmentação automática, optou-se pela segmentação manual de cada árvore individual no CloudCompare. Este procedimento permitiu um controle rigoroso sobre a delimitação de cada indivíduo, evitando a inclusão de ruídos na modelagem espacial. Adicionalmente, aplicou-se uma limpeza manual minuciosa em cada nuvem segmentada para a remoção completa de pontos referentes à copa e aos galhos laterais, preservando-se estritamente a estrutura do fuste (tronco principal) para a representação fiel da geometria dendrométrica (Figura 2).

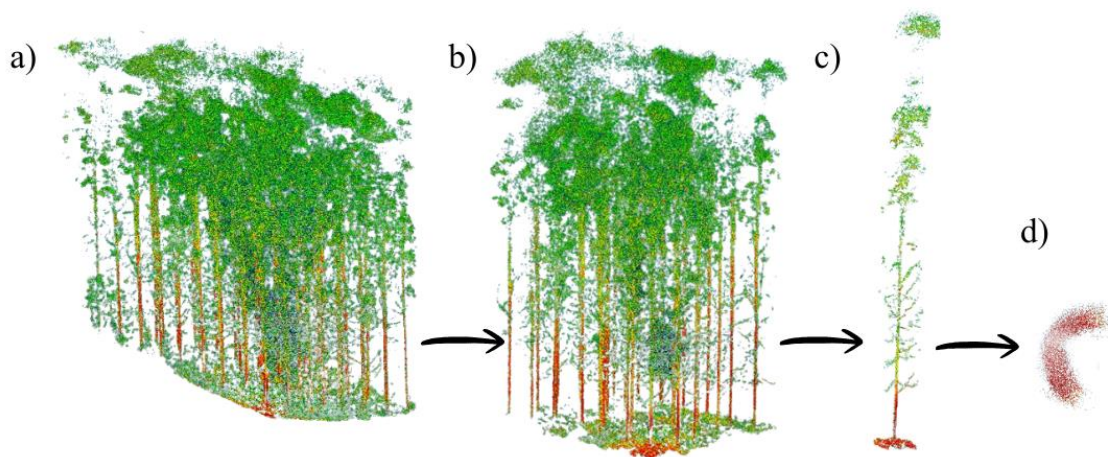


Figura 2 – Exemplo da limpeza manual dos dados: a) dados originais dentro da parcela; b) dados normalizados; c) árvores isoladas e limpas; d) seção transversal do fuste na região do *dap*.

Com as árvores devidamente individualizadas e limpas foram extraídos diâmetros e alturas de maneira automática usando o pacote lidR e ITSM (Terry, 2022) no ambiente R. A altura da árvore foi determinada pela altura do ponto mais elevado, enquanto a sua localização planimétrica foi determinada pela média das coordenadas X e Y dos pontos. O *dap* foi estimado utilizando a função *dbh_pc()*, que usa o algoritmo *random sample consensus* (RANSAC) para

o ajuste de círculos em seções transversais do fuste. Devido ao método de varredura estático a nuvem de pontos não cobria a circunferência completa dos fustes, apresentando uma geometria de arco em função da oclusão da face oposta ao sensor (Figura 2d). Análises preliminares (não demonstradas aqui) indicaram que o método RANSAC foi adequado por sua capacidade de reconstruir a seção circular a partir de segmentos parciais da circunferência.

O algoritmo foi parametrizado com um limiar de distância (*threshold*) de 0,03 m (3 cm). Esse parâmetro assegura que apenas os pontos situados dentro dessa tolerância em relação à borda da seção circular (*inliers*) sejam considerados no ajuste, mitigando a influência de ruídos, irregularidades da casca ou galhos próximos ao tronco. Os demais parâmetros da função foram mantidos com o padrão. Ressalta-se, contudo, que não foi possível obter as estimativas de *dap* e *h* para todos os indivíduos. Árvores que apresentaram densidade de pontos insuficientes em um intervalo vertical de 10 cm no nível da seção transversal a 1,30 m, ou na região do dossel, impossibilitando a identificação ou o ajuste geométrico, foram excluídas das análises subsequentes.

2.5. Análises

Previamente às análises de acurácia, avaliou-se a eficiência de detecção e a capacidade de extração das variáveis do sistema PLS. Esta etapa consistiu em quantificar a Taxa de Omissão (TO), que representa a proporção de indivíduos inventariados pelo método convencional (referência) cujos fustes não foram identificados ou não permitiram o ajuste geométrico para a estimativa do *dap* e *h*. A omissão foi calculada conforme a Equação 1:

$$TO = \left(\frac{n_{campo} - n_{PLS}}{c_{campo}} \right) * 100 \quad (1)$$

Em que TO é a taxa de omissão (%); n_{campo} é o número total de árvores observadas no inventário florestal; n_{PLS} é o número de árvores efetivamente detectadas e processadas pelo sensor PLS.

A concordância entre as medições de campo e as estimativas de *dap* e *h* obtidas por PLS foi analisada por meio de gráficos de dispersão e pelo quadrado da correlação de Pearson (r^2 , 2). Neste processo, os dados foram estratificados em classes de distância entre o sensor e as árvores (0–4,9 m; 5–9,9 m; 10–19,9 m; 20–24,9 m; e >25 m) a fim de avaliar o efeito da posição do sensor na acurácia das estimativas. Complementarmente, a distribuição dos erros foi

caracterizada por meio de histogramas. Esta análise permitiu verificar a frequência com que os desvios ocorrem, bem como avaliar a simetria da distribuição e a presença de viés nas estimativas para ambos os atributos.

Em seguida, foi avaliada a distribuição espacial da magnitude dos erros para cada um dos três estágios de desenvolvimento (jovem, intermediário e maduro), visando reduzir a variabilidade associada às diferenças estruturais entre os povoamentos. O módulo dos erros relativos das estimativas (ER, 3) foi calculado individualmente para cada árvore, com base nos dados de referência de campo.

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \quad (2)$$

$$ER_i = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100 \quad (3)$$

Em que y_i e \hat{y}_i são os valores observados e estimados para a árvore $i=1, \dots, n$, respectivamente, com médias \bar{y} e $\bar{\hat{y}}$; e e_i o erro médio relativo da árvore i .

O interpolador determinístico de ponderação pelo inverso da distância (*inverse distance weighting* - IDW) foi aplicado ao módulo do erro relativo ($z = |ER_i|$) para espacializar a magnitude dos erros e identificar de padrões de sua distribuição em cada estágio de desenvolvimento. A escolha deste método fundamenta-se na premissa de que a similaridade entre os erros de estimativa decai com o aumento da distância entre as árvores (Tobler, 1970).

Diferentemente de métodos estocásticos, como a krigagem ordinária, o IDW não requer o ajuste de semivariogramas teóricos nem a verificação de pressupostos rígidos de estacionariedade, isotropia ou normalidade dos dados (Webster; Oliver, 2007). Essa característica torna o IDW particularmente adequado para análises exploratórias da variabilidade espacial local, especialmente em situações em que os dados apresentam elevada heterogeneidade, não estacionariedade ou estrutura de dependência espacial de curto alcance, nas quais o ajuste de semivariogramas experimentais se mostra instável ou pouco informativo (Cressie, 1993; Haining, 2004). Além disso, o IDW reduz a subjetividade associada à seleção e ao ajuste de modelos geoestatísticos, oferecendo uma alternativa consistente para a visualização da continuidade espacial dos erros de estimativa.

A superfície interpolada dos erros foi gerada por meio da atribuição de pesos aos pontos amostrais vizinhos, de forma que observações mais próximas exercessem maior influência

sobre o valor estimado do que aquelas mais distantes. A magnitude do erro estimada (\hat{z}) em um local não amostrado (s_0) foi obtida como uma média ponderada dos valores observados na vizinhança, na qual os pesos decaem com o aumento da distância, conforme a Equação 4 (Shepard, 1968):

$$\hat{z}(s_0) = w_i z(s_i) \text{ em que } w_i = \frac{\frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (4)$$

Em que $\hat{z}(s_0)$ é o valor estimado da magnitude do erro na posição s_0 ; e $z(s_i)$ é o valor observado da magnitude do erro na amostrada s_i ; d_i é a distância euclidiana entre o ponto a ser estimado s_0 e o ponto amostrado s_i ; p é o expoente de ponderação (fator de potência); e n é número máximo de pontos vizinhos utilizados.

Os mapas de predição foram gerados no ArcGIS Pro (versão 3.6.0) usando fator de potência $p = 1$ e uma vizinhança com número mínimo de 4 e máximo de 12 pontos (Isaaks & Srivastava 1989). A confiabilidade dos modelos espaciais resultantes foi aferida por meio da técnica de validação cruzada do tipo *leave-one-out*. A acurácia da interpolação foi avaliada utilizando a raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM, 5), o erro médio absoluto (EMA, 6) e o viés (7). Para a representação cartográfica, os valores interpolados de erro foram reclassificados em intervalos discretos de magnitude para facilitar a interpretação visual de zonas de maior ou menor acurácia do sensor.

$$\text{RQEM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2} \quad (5)$$

$$\text{EMA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \hat{z}_i| \quad (6)$$

$$\text{Viés} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i) \quad (7)$$

Em que:

z_i e \hat{z}_i são os valores observados e estimados do módulo do erro de estimativa para a árvore $i=1, \dots, n$.

Por fim, foram utilizados diagramas de caixa (*boxplot*) para caracterizar a variação da magnitude do erro relativo das estimativas dendrométricas em função do afastamento do sensor. A adoção desse método justifica-se pela natureza tipicamente variável dos erros de mensuração florestal. Diferentemente de modelos globais que assumem uma dispersão constante dos dados, o *boxplot* permite identificar visualmente o aumento da variabilidade e a ocorrência de valores

extremos à medida que o afastamento do sensor aumenta. Essa análise torna-se fundamental para compreender como a precisão das medidas se comporta em diferentes raios de alcance. Com base na dispersão observada nos gráficos, torna-se possível delimitar uma distância segura de operação para o sistema PLS, na qual os erros de estimativa permanecem dentro de níveis aceitáveis para o inventário florestal de precisão.

3. RESULTADOS

3.1. Eficiência de detecção e extração das variáveis dendrométricas

A completude da base de dados gerada pelo sensor PLS revelou uma taxa de omissão global de 30,62%, com comportamentos distintos conforme a estrutura do povoamento (Tabela 2). Embora o inventário de referência contabilizasse 960 indivíduos, o ajuste geométrico e a extração de variáveis dendrométricas foram viabilizados para 666 árvores.

Tabela 2 – Eficiência de detecção e extração de dados via PLS por classe de idade.

Classe	Referência (n)	Detectados (n)	Omissão (n)	Omissão (%)
Jovem	337	168	169	50,15
Intermediária	296	250	46	15,54
Madura	327	248	79	24,16
Total	960	666	294	30,62

Os índices de omissão apresentados foram coincidentes para ambas as variáveis, indicando que a falha na detecção do fuste ou a densidade insuficiente de pontos impossibilitou, simultaneamente, o ajuste do cilindro para a *dap* e a identificação do ápice da copa para a altura. Nota-se que a classe Jovem representou o maior desafio operacional, com 50,15% de omissões, enquanto a classe Intermediária obteve o melhor desempenho de detecção. Estes 666 indivíduos detectados constituem a base de dados para as análises de precisão e distribuição de erros apresentadas a seguir.

3.2. Distribuição dos resíduos das estimativas

O resíduo entre os valores de referência e os valores estimados variou de acordo com as variáveis analisadas e a distância entre o sensor-árvore (Figura 3). Em geral, o coeficiente de

correlação (r^2) para o *dap* foi inferior ao observado para *h*, sem uma tendência geral clara, sendo fortemente influenciado pela distância. Os valores estimados de *dap* variaram de 1 a 36 cm, apresentando uma amplitude maior em comparação aos dados de referência (7 a 25 cm). Além disso, foi observado um aumento acentuado da dispersão nas classes de maior distância, reduzindo a correlação de 0,71 para árvores localizadas a até 5 m do sensor para valores inferiores a 0,11 em distâncias maiores. Em contraste, as estimativas de *h* apresentaram uma amplitude (14–38 m) mais próxima à dos valores de referência (13–41 m), com uma redução mais gradual da correlação à medida que a distância ao sensor aumentou, diminuindo de 0,84 para árvores localizadas a até 5 m do sensor para 0,35 em distâncias maiores.

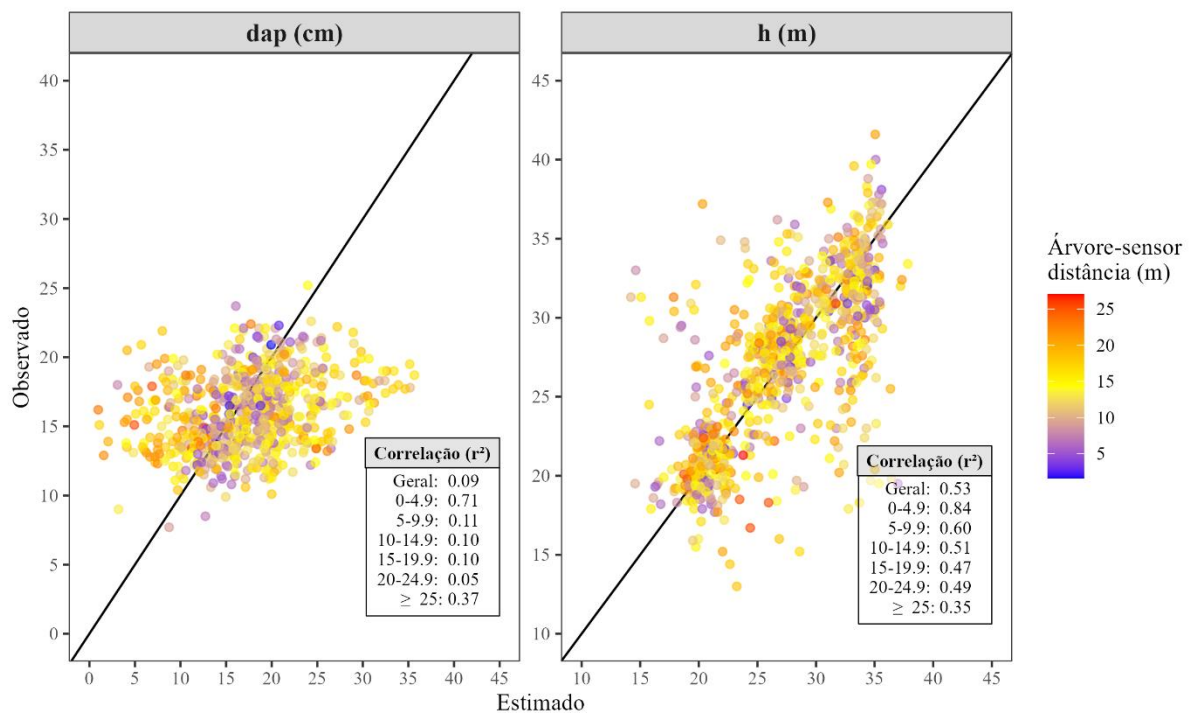


Figura 3 – Dispersão entre os valores de referência e os estimados de *dap* (a) e *h* (b) nas diferentes classes de distância. A linha tracejada refere-se a concordância perfeita (1:1).

Embora os valores de correlação e os gráficos de dispersão forneçam uma visão geral da concordância entre valores observados e estimados, eles não permitem avaliar a forma, a simetria e a dispersão dos erros de estimativa. Nesse contexto, a distribuição dos resíduos foi analisada para caracterizar o comportamento dos erros, especialmente quanto à presença de viés.

A Figura 4 apresenta a distribuição dos resíduos de *dap* e *h* considerando apenas as árvores localizadas a até 5 m do sensor, estratificada por classes de idade. Em todas as classes os resíduos de ambas as variáveis apresentaram distribuição centrada em torno de zero,

indicando ausência de viés sistemático pronunciado quando o sensor se encontra próximo às árvores. No entanto, foi possível observar diferenças quanto à dispersão dos resíduos entre as classes. Para o *dap*, as classes jovem e intermediária apresentaram distribuições mais concentradas, enquanto a classe madura mostrou maior espalhamento e assimetria. Para a variável *h*, a classe jovem apresentou distribuição mais estreita, ao passo que as classes intermediárias e madura exibiram maior variabilidade e caudas mais longas, indicando a ocorrência ocasional de erros elevados, ainda que a maior parte das estimativas permaneça próxima dos valores de referência.

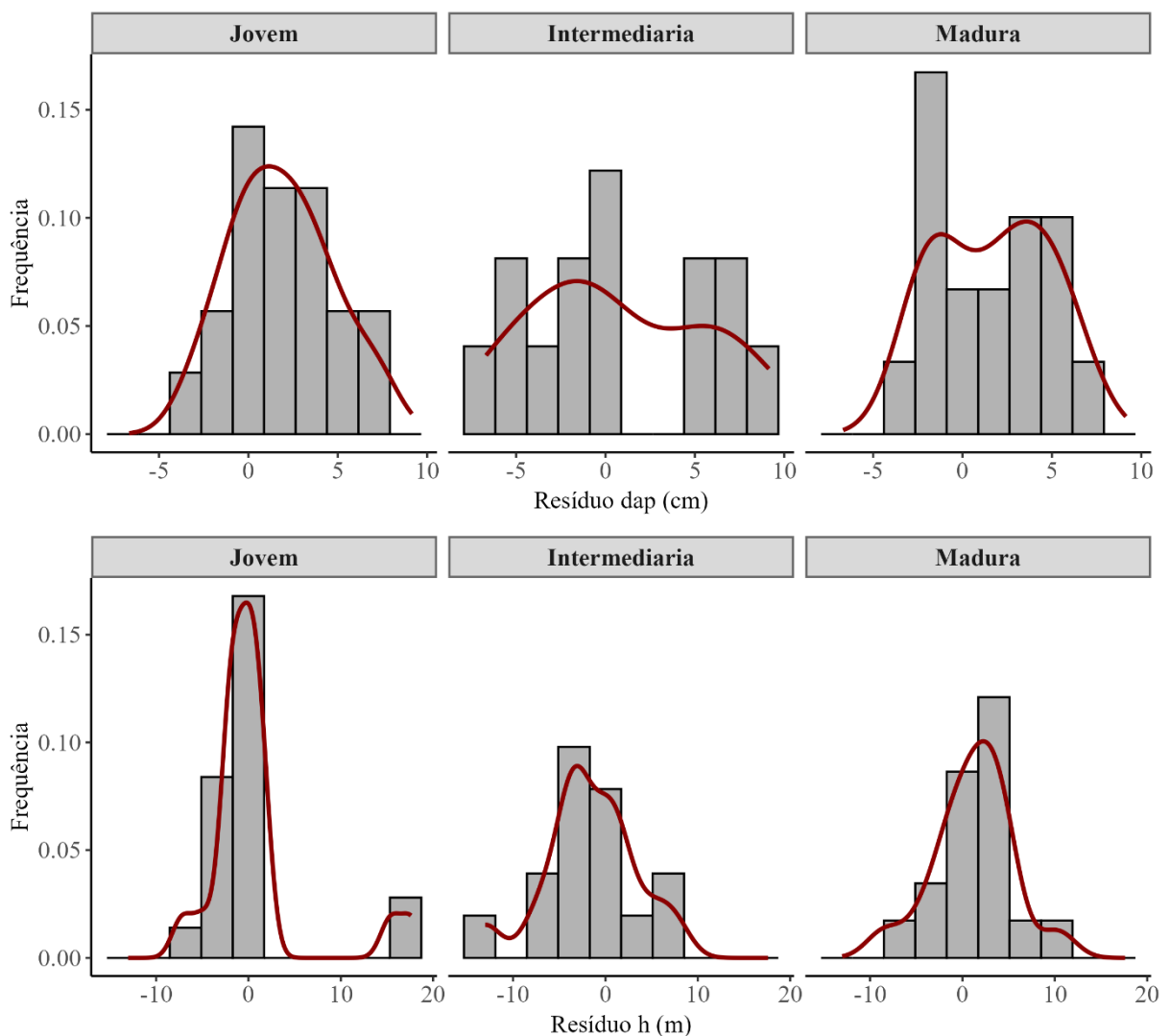


Figura 4 – Distribuição dos resíduos das estimativas de a) *dap* e b) *h* para árvores localizadas a até 5 m do sensor, estratificada por classe de idade. As barras representam histogramas normalizados por densidade, e as linhas contínuas indicam as curvas de densidade kernel.

3.3. Distribuição espacial da magnitude dos erros

A investigação da distribuição espacial revelou que a magnitude dos erros relativos não ocorre de forma aleatória, apresentando padrões semelhantes entre as diferentes classes de idade. Para o *dap*, observou-se um nítido gradiente radial, com o incremento do erro à medida que as árvores se distanciam do sensor (Figura 5a). À medida que se avança para as bordas das parcelas, há um aumento progressivo na magnitude dos erros, identificado pelos tons vermelhos nas periferias (Figura 5b). Este padrão foi consistente nas três classes de desenvolvimento, mais notadamente no estágio jovem e maduro.

Em contrapartida, os erros de *h* para a classe jovem não apresentaram um padrão espacial evidente, com predominância de baixos erros em toda a parcela e valores elevados ocorrendo de forma isolada. Já nas classes intermediária e madura, houve mudança no comportamento espacial do erro: enquanto os erros menores distribuíram-se uniformemente, os erros elevados tenderam a se aglomerar na porção média da parcela. Na classe madura, especificamente, verificou-se uma acentuada heterogeneidade local, com grupos de baixos erros intercalados por zonas de erros elevados (Figura 6b), refletindo a maior complexidade estrutural desses povoamentos.

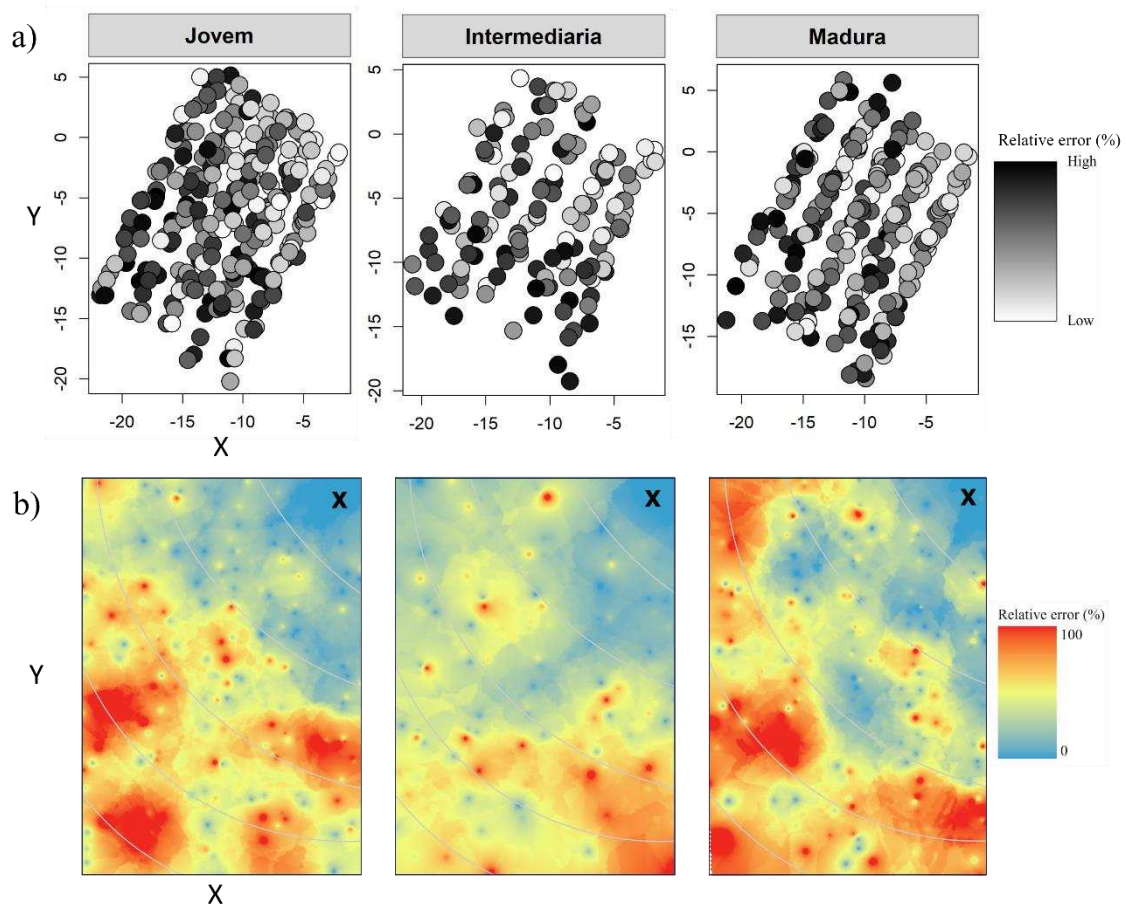


Figura 5 – Distribuição espacial dos erros relativos do *dap* para as classes avaliadas. a) Valores observados por árvore; b) Superfície interpolada (IDW) evidenciando o gradiente de erro. O símbolo “X” indica a posição do sensor durante a varredura.

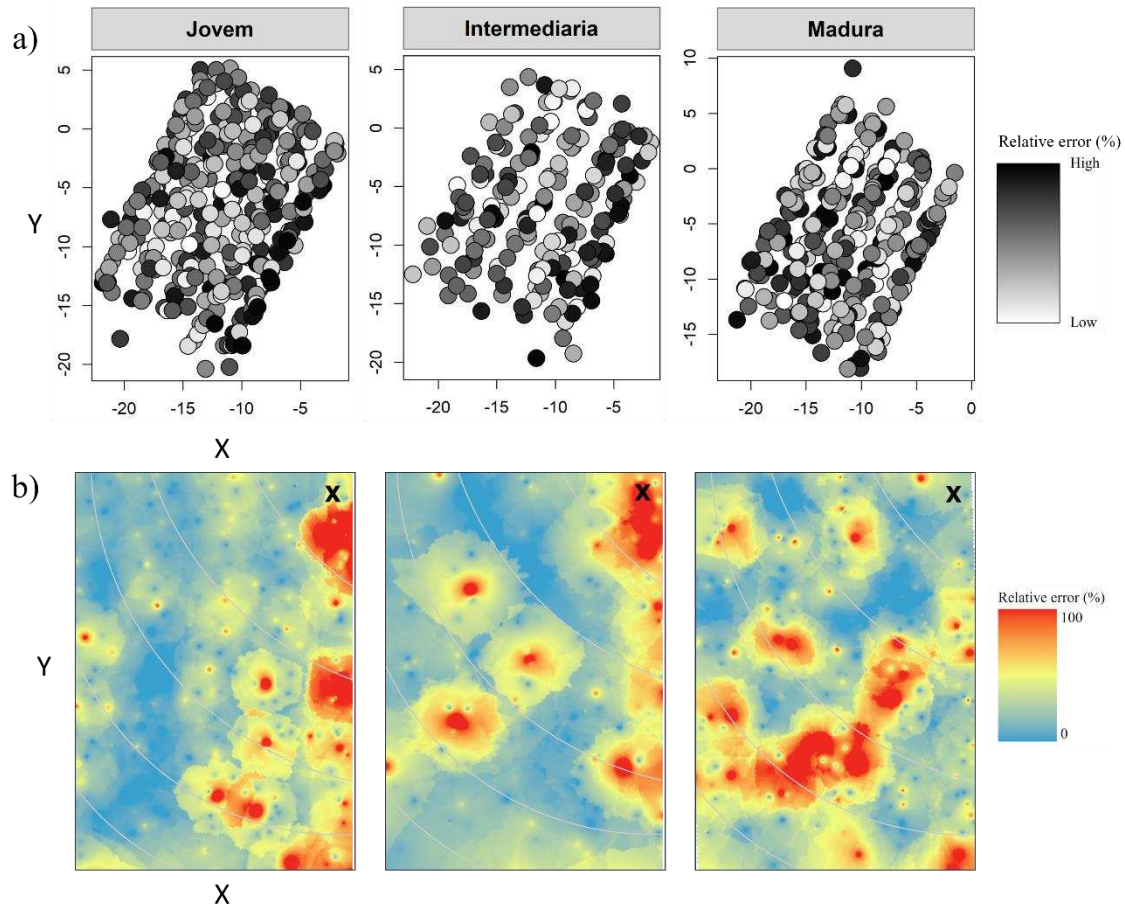


Figura 6 – Distribuição espacial dos erros relativos da *h* para as classes avaliadas. a) Valores observados por árvore; b) Superfície interpolada (IDW) evidenciando o gradiente de erro. O símbolo “X” indica a posição do sensor durante a varredura.

A distribuição espacial dos erros, obtida por meio do interpolador IDW, foi interpretada com base nas estatísticas de validação cruzada (Tabela 3). Observou-se variação entre as classes de idade e as variáveis analisadas, com padrões mais consistentes na classe intermediária, seguidos pelas fases jovem e madura. Ao comparar as variáveis, verifica-se que o *dap* apresentou erros de predição (RQEM e EMA) consistentemente maiores que os da altura em todos os estratos avaliados. Para *h*, os menores valores de RQEM ocorreram nas fases jovem e intermediária (12,66% e 9,99%, respectivamente), com viés próximo de zero. Na fase madura, houve aumento do RQEM e do viés para ambas as variáveis. Nessa classe, o *dap* apresentou os maiores valores de RQEM e EMA, enquanto a *h* registrou erros superiores aos das fases anteriores, acompanhados por incremento no viés.

Tabela 3 – Estatísticas de desempenho para a interpolação espacial dos erros relativos para as variáveis *dap* e *h* por estágio de desenvolvimento.

Variável	Classe	RQEM (%)	EMA	Viés
<i>dap</i>	Jovem	26,08	20,71	-0,06
	Intermediária	23,94	18,41	0,91
	Madura	27,40	21,59	-0,68
<i>h</i>	Jovem	12,66	7,54	0,05
	Intermediária	9,99	6,43	0,03
	Madura	15,08	10,52	0,34

3.4. Efeito da distância na magnitude e dispersão dos erros

A análise da distribuição dos erros em função das classes de distância revelou comportamentos distintos entre as variáveis (Figura 7). Para o *dap*, houve um aumento expressivo na dispersão dos dados conforme a distância do sensor aumentava. Nas distâncias iniciais (0-5 m), a mediana do erro foi de 5,37%, indicando maior consistência das estimativas nesta faixa. Contudo, na faixa intermediária (10-15 m), a mediana do erro elevou-se para 23,15%, com forte presença de valores extremos (*outliers*). Essa tendência de degradação acentuou-se após os 20 m de distância, onde a mediana atingiu 42,45%.

Em contraste, os erros associados à estimativa de *h* demonstraram estabilidade frente ao incremento da distância. As medianas dos erros para a altura não apresentaram tendência de crescimento definida, variando entre 3,25% (0-5 m) e 6,12% (10-15 m), permanecendo consistentemente abaixo de 10% em todas as classes de distância. No entanto, observou-se que os erros extremos concentraram-se majoritariamente após os 5 m de distância, acompanhados por um aumento gradual da variabilidade total dos dados, embora a amplitude interquartilica tenha se mantido consideravelmente inferior à observada para o *dap*.

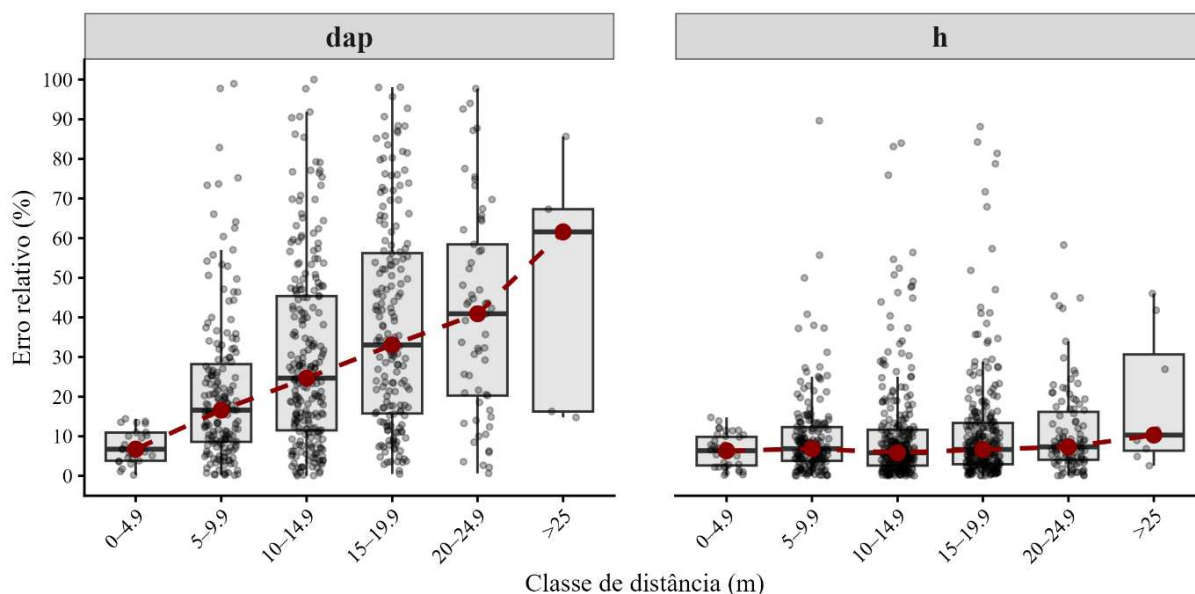


Figura 7 - Distribuição dos erros relativos das estimativas de a) *dap* e b) *h* em classes de distância.

4. DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo evidenciaram de forma objetiva o comportamento espacial das estimativas de *dap* e *h* obtidos pelo PLS em plantios homogêneos de eucalipto. A análise confirmou a hipótese de que a magnitude dos erros tem fortes variações derivadas da distância entre o sensor e a árvore, porém, com comportamento distinto entre os atributos. A estrutura de dependência espacial das estimativas do *dap* caracteriza-se pelo aumento progressivo da magnitude dos erros à medida que a distância entre o sensor e a árvore aumenta. Em contraste, os resíduos da *h* tiveram fraca dependência espacial, porém com aumento das chances de ocorrência de valores extremos ao longo do gradiente de distâncias. De forma crucial, esses resultados caracterizam a propagação intrínseca dos erros em função da distância (perspectiva estática), e não a acurácia final de um inventário dinâmico. Em aplicações práticas, o deslocamento do operador (trajetória de caminhamento) tende a mitigar naturalmente esses erros dependentes da distância, ao aproximar o sensor dos alvos, reforçando assim a importância de um planejamento adequado da aquisição dos dados.

Além da acurácia das árvores detectadas, a eficiência de detecção revelou-se um limitador crítico, especialmente em povoamentos jovens. A taxa de omissão global de 30,62% (Tabela 2) indica que uma parcela significativa da estrutura do povoamento permanece 'invisível' ao processamento automatizado sob condições de varredura estática. Esse fenômeno foi drasticamente acentuado na classe Jovem, onde a omissão de 50,15% sugere que o diâmetro

reduzido dos fustes, aliado à persistência de galhos baixos e à proximidade da folhagem ao tronco, cria um ambiente de alto ruído que impede o isolamento do fuste e o subsequente ajuste cilíndrico. Diferentemente das classes Intermediária (15,54%) e Madura (24,16%), onde a desrama natural facilita a distinção fuste-ruído, a classe jovem impõe um desafio de resolução espacial ao sensor, corroborando as observações de Liang *et al.* (2018) sobre a influência das obstruções no estrato inferior da floresta.

O padrão espacial observado para o *dap* reflete as limitações físicas e geométricas do sensor PLS. Para estimar o diâmetro com precisão, os algoritmos de processamento dependem diretamente da densidade e da distribuição angular dos retornos laser para a reconstrução da geometria cilíndrica do fuste (Forsman *et al.*, 2018; Forsman; Holmgren; Olofsson, 2016). Entretanto, à medida que a distância entre o sensor e a árvore aumenta, a densidade de pontos incidentes sobre o tronco reduz-se significativamente, ao mesmo tempo em que ocorre o aumento do ângulo de incidência do feixe laser, comprometendo a definição geométrica da seção circular utilizada no ajuste do diâmetro.

Esse comportamento físico está de acordo com Del Perugia *et al.* (2019), que demonstraram que a redução da intensidade dos pontos desestabiliza o ajuste geométrico do fuste, aumentando a variabilidade das estimativas. Além da densidade, fatores intrínsecos ao feixe laser atuam como fontes de erro sistemático. Conforme detalhado Abegg *et al.* (2021), em sistemas móveis, o distanciamento do alvo resulta não apenas em menor densidade de amostragem do fuste, mas também no alargamento do diâmetro efetivo do feixe (divergência), intensificando o “efeito de pixel misto” nas bordas do fuste. Nessas condições, um único pulso atinge parcialmente o tronco e o fundo, gerando ruídos (“pontos fantasmas”) que distorcem a nuvem de pontos. Esses mecanismos explicam, do ponto de vista físico, a dispersão excessiva observada nas classes de distância mais afastadas.

Nesse contexto, valores médios de viés próximos de zero (Tabela 3) não indicam elevada precisão das estimativas de *dap*, mas sim a compensação entre erros positivos e negativos ao longo do gradiente de distâncias entre o sensor e as árvores. Assim, a interpretação do viés deve ser feita de forma integrada às demais métricas de erro, como o RQEM e o EMA. Os histogramas de resíduos (Figura 4) e os gráficos de correlação (Figura 3) evidenciam que, apesar da proximidade do viés médio a zero, a dispersão das estimativas aumenta significativamente com a distância, especialmente para o *dap*. Esse comportamento revela um padrão de heterocedasticidade, no qual erros de sinais opostos se anulam estatisticamente, mascarando a degradação da qualidade das estimativas quando avaliadas apenas por métricas globais.

Adicionalmente, a oclusão exerce influência determinante sobre a distribuição espacial dos erros. Em varreduras estáticas, a presença de árvores vizinhas e sub-bosque cria um efeito de sombreamento, impedindo que o feixe laser atinja as árvores posteriores. Esse fenômeno resulta em nuvens de pontos fragmentadas ou excessivamente assimétricas, o que compromete a estabilidade dos algoritmos de ajuste circular (Hyypä *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2016). Essa limitação física explica a formação de núcleos de erro concentrados nas superfícies interpoladas (IDW), especialmente nas classes jovem e madura. Nesses ambientes, a maior complexidade estrutural agrava o bloqueio do sinal, tornando as estimativas nas bordas das parcelas, onde o ângulo de incidência já é desfavorável, ainda mais suscetíveis a falhas de modelagem.

Diferentemente do *dap*, a estimativa da *h* mostrou-se menos sensível aos efeitos da distância e da oclusão. Esse comportamento está associado ao fato de que a altura depende da identificação correta do topo da árvore, e não da reconstrução detalhada da geometria do fuste. Como consequência, a altura é menos afetada pela redução da densidade de pontos e pela assimetria da nuvem causada pela oclusão parcial do tronco, resultando em maior robustez das estimativas mesmo com o aumento da distância ao sensor. Estudos prévios com sistemas de varredura a laser terrestre indicam que a subestimação da altura ocorre principalmente quando o topo não é adequadamente amostrado, seja por oclusão do dossel ou por limitações no alcance do sensor. Cabo *et al.*, (2018) compararam o TLS com WLS e demonstraram que sistemas com alcance reduzido tendem a subestimar a altura de árvores mais altas, uma vez que os topos permanecem fora da nuvem de pontos, resultando em erros elevados e viés negativo sistemático.

No presente estudo, entretanto, a estabilidade das estimativas de altura, mesmo nas maiores distâncias ao sensor, está em consonância com a ausência de padrões espaciais bem definidos nos mapas de erro e indica que os topos foram, em grande parte, adequadamente amostrados pela geometria de aquisição do PLS, mesmo com a adoção de uma varredura estática. Esse comportamento sugere que, diferentemente do observado em sistemas com alcance limitado, a oclusão do dossel não atuou como um fator dominante na propagação dos erros de altura. A análise por estágio de desenvolvimento reforça essa interpretação. Na classe jovem, a estrutura mais simples do povoamento, caracterizada por menor sobreposição de copas e ausência de sub-bosque denso, favorece a penetração do laser e a detecção do topo das árvores, resultando em erros reduzidos e distribuídos de forma homogênea. Nas classes intermediária e madura, o aumento do RQEM observado para a *h*, especialmente na fase madura, reflete o fechamento do dossel e a maior interferência da biomassa superior. Ainda assim, a ausência de

padrões espaciais bem definidos indica que a h é menos suscetível à dependência espacial dos erros quando comparada ao dap .

Apesar dessa maior robustez geral, observou-se que as estimativas de altura das árvores mais próximas ao sensor também apresentaram erros relevantes. Esse comportamento está associado às limitações impostas pelo ângulo de escaneamento em curtas distâncias, nas quais a geometria de aquisição pode restringir a amostragem adequada do topo da árvore. Conforme destacado por Wilkes et al. (2017), a estimativa confiável da altura total em varreduras estáticas depende fortemente da geometria de aquisição, havendo um equilíbrio entre a resolução angular da varredura e a captura de múltiplos ângulos de visada capazes de mitigar a oclusão do dossel superior. Nesses casos, uma maior distância entre o sensor e a árvore pode ser benéfica, ao ampliar o ângulo de visada e favorecer a interseção dos feixes laser com o topo da copa. Nesse sentido, Terryn *et al.* (2024) observaram que tais desafios métricos não são exclusivos de sensores a laser. Ao estudarem florestas tropicais, os autores constataram que métodos tradicionais de inventário tendem a subestimar a altura de árvores de grande porte de forma ainda mais severa que o TLS, evidenciando limitações inerentes às abordagens convencionais e discrepâncias substanciais nas alometrias amplamente utilizadas.

A metodologia adotada neste estudo combina um desenho experimental inovador com escolhas analíticas conservadoras. Embora sistemas de varredura a laser portátil sejam comumente avaliados em protocolos dinâmicos, baseados em caminhamentos, neste trabalho o PLS foi empregado em uma abordagem de escaneamento estático, o que permitiu isolar e analisar de forma controlada a estrutura espacial dos erros das estimativas de dap e h em função da distância ao sensor. Essa abordagem reduz a influência de fatores associados à trajetória e velocidade de deslocamento, frequentemente presentes em aquisições móveis, e viabiliza a avaliação explícita da estrutura espacial das incertezas dentro das parcelas, aspecto ainda pouco explorado em estudos com PLS.

Do ponto de vista analítico, a abordagem adotada no nosso estudo está alinhada ao princípio clássico da geoestatística de que a análise exploratória deve preceder a modelagem formal, já que a compreensão dos padrões espaciais é fundamental antes de qualquer inferência ou generalização estatística (Isaaks; Srivastava, 1989). Nesse contexto, a utilização do interpolador determinístico IDW mostrou-se adequada para revelar gradientes espaciais, zonas de transição e agrupamentos locais dos erros, sem impor pressupostos fortes de estacionariedade ou estrutura espacial global. Estudos de revisão e comparação metodológica indicam que o IDW é particularmente apropriado para análises exploratórias em ambientes com forte controle local e elevada heterogeneidade espacial, quando o objetivo principal é interpretar

padrões e compreender processos, e não realizar previsões ótimas ou inferência probabilística formal (Li; Heap, 2011). Assim, a opção por um método simples e transparente reforça o caráter conservador da análise e contribui para interpretações mais robustas do comportamento dos erros associados ao PLS.

Embora os dados de PLS sejam usualmente coletados em caminhamentos, a abordagem estática deste estudo serviu como um diagnóstico rigoroso dos limites físicos do sensor. Ao isolar o efeito da distância, definiu-se um limiar conservador de confiabilidade que pode orientar o planejamento de varreduras móveis. Considerando que o *dap* manteve precisão elevada até 5 metros mesmo na condição mais desfavorável (escaneamento estático), esse valor pode ser interpretado como um limiar conservador de confiabilidade operacional. Assim, recomenda-se que as trajetórias de caminhada sejam desenhadas de modo que o operador transite a uma distância aproximada de 5 m das árvores-alvo. Essa diretriz de campo assegura que a densidade de pontos permaneça ideal para a modelagem dos fustes. Ao respeitar esse raio de segurança, a movimentação natural do operador deve atuar não apenas para preencher a geometria (superando as oclusões críticas observadas neste estudo), mas também para garantir redundância de dados nas zonas onde o sensor é mais preciso. Portanto, manter o caminhada dentro desse envelope de distância transforma o que foi um limite no modo estático em uma zona de garantia de qualidade para o modo dinâmico.

Este trabalho focou no uso de PLS para atributos biométricos de florestas plantadas de eucalipto, de modo que a distribuição espacial das estimativas envolvendo outros sensores e sistemas florestais requer investigação. Por exemplo, estudos anteriores indicam que sensores TLS, com maior precisão de distância e menor divergência do feixe, são considerados os sistemas de varredura a laser de referência para a obtenção de atributos estruturais florestais (Liang *et al.*, 2018) enquanto estimativas envolvendo florestas naturais podem ter erros maiores devido a maior heterogeneidade da floresta (Gonzalez de Tanago *et al.*, 2018). Mesmo assim, os resultados são inovadores e podem servir para orientar futuras aplicações envolvendo a coleta de dados florestais de lidar a partir do terreno.

5. CONCLUSÃO

A análise da acurácia do PLS em modo estático permitiu identificar padrões espaciais de erro e estabelecer limites operacionais claros para inventários florestais. Conclui-se que a estimativa da *h* pelos dados do PLS é estável e robusta, sendo pouco influenciada pela distância ao sensor ou pela oclusão do dossel, o que valida a capacidade do equipamento em detectar o

ápice das árvores mesmo em posições de varredura desfavoráveis. Em contrapartida, a estimativa do *dap* sofre degradação progressiva da acurácia e forte dependência espacial à medida o sensor se afasta da árvore. A confiabilidade das estimativas de diâmetro é restrita a um raio operacional de aproximadamente 5 metros em torno do sensor, sendo este desempenho agravado quando a estrutura da floresta se torna mais complexa, como na evolução da idade do povoamento. Tais fatos sugerem que aplicações operacionais do PLS em modo dinâmico (caminhamento) devam garantir que as árvores sejam medidas a uma distância de 5 m do sensor para evitar erros exacerbados de estimativa. Futuros estudos devem focar na avaliação da distribuição espacial dos erros de outros sistemas de lidar terrestres e tipologias florestais.

REFERÊNCIAS

ABEGG, M. *et al.* Impact of Beam Diameter and Scanning Approach on Point Cloud Quality of Terrestrial Laser Scanning in Forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New Jersey, vol. 59, n° 10, p. 8153–8167, 2021.

BALENOVIĆ, I. *et al.* Hand-held personal laser scanning – current status and perspectives for forest inventory application. **Croatian Journal of Forest Engineering**, Zagreb, vol. 42, n° 1, p. 165–183, 2021.

BURKHART, H.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. 1 Ed.ed. Dordrecht: Springer, 2012.

CABO, C. *et al.* Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. **Remote Sensing**, Basel, vol. 10, n° 4, 2018.

CADENA, C. *et al.* Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New Jersey, vol. 32, n° 6, p. 1309–1332, 2016.

CHEN, S. *et al.* Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. **Plos One**, San Francisco, vol. 14, p. 1–22, 2019.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. 2nd ed.ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

DEL PERUGIA, Barbara *et al.* Influence of scan density on the estimation of single-tree attributes by hand-held mobile laser scanning. **Forests**, Basel, vol. 10, n° 3, p. 1–13, 2019.

DONALD, Shepard; A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. 1968, New York. **ACM National Conference**. New York: 1968. p. 517–524.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2025**. Rome: 2025. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd6709en>.

FORSMAN, M. *et al.* Bias of cylinder diameter estimation from ground-based laser scanners with different beam widths: A simulation study. **ISPRS Journal of Photogrammetry and**

Remote Sensing, Amsterdam, vol. 135, p. 84–92, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.013>.

FORSMAN, M.; HOLMGREN, J.; OLOFSSON, K. Tree stem diameter estimation from mobile laser scanning using line-wise intensity-based clustering. **Forests**, Basel, vol. 7, n° 9, 2016.

GOLLOB, C.; RITTER, T.; NOTHDURFT, A. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology. **Remote Sensing**, Basel, vol. 12, n° 9, 2020.

GONZALEZ DE TANAGO, J. *et al.* Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial LiDAR. **Methods in Ecology and Evolution**, Londres, vol. 9, n° 2, p. 223–234, 2018.

HAINING, R. **Spatial Data Analysis: Theory and Practice**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

HOPKINSON, C. *et al.* Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, vol. 34, n° 3, p. 573–583, 2004.

HYYPPÄ, E. *et al.* Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, vol. 161, n° January, p. 246–262, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.018>.

IBÁ, Industria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2025**. Brasília: 2025. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes/relatorios-anuais/>.

ISAAKS, E. H., & SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, Amsterdam, vol. 6, n° 3–4, p. 228–241, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>.

LIANG, X. *et al.* Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Masala, vol. 50, n° 2, p. 661–670, 2012.

LIANG, X. *et al.* International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Masala, vol. 144, n° June, p. 137–179, 2018.

LIANG, X. *et al.* Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Masala, vol. 115, p. 63–77, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>.

LOVELL, J. L. *et al.* Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, vol. 29, n° 5,

p. 607–622, 2003. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5589/m03-026>. Acesso em: 26 nov. 2024.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, vol. 11, p. 1633–1644, 2007.

PIRES, R. P. *et al.* Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, vol. 187, n° October 2021, p. 211–224, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.004>.

ROUSSEL, J. R.; GOODBODY, T. R. H; TOMPALSKI, P. **The lidR package**. 2024. Disponível em: <https://r-lidar.github.io/lidRbook/#development>. Acesso em: 9 jul. 2025.

SOLODUKHIN, V. I., ZHUKOV, A. Y. A., MAZHUGIN, I. N., AND NARKEVICH, V. I. Metody Izuchenija Vertikal'nyh Sechenij Drevostoev (Method of study of vertical sections of forest stands). **Leningrad Scientific Research Institute of Forestry**, Leningrado, p. 55, 1976.

TEAM, R Core. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.

TERRYN, L. **ITSMe package**. 2022. Disponível em: <https://github.com/lmterrYN/ITSMe>. Acesso em: 2 dez. 2025.

TERRYN, L. *et al.* New tree height allometries derived from terrestrial laser scanning reveal substantial discrepancies with forest inventory methods in tropical rainforests. **Global Change Biology**, Oxford, vol. 30, n° 8, p. 1–18, 2024.

TOBLER; W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Taylor & Francis, Ltd.**, Worcester, vol. 46, p. 234–240, 1970.

TUPINAMBÁ-SIMÕES, F. *et al.* Assessing the Performance of a Handheld Laser Scanning System for Individual Tree Mapping—A Mixed Forests Showcase in Spain. **Remote Sensing**, Basel, vol. 15, n° 5, 2023.

VAN LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest Mensuration**. Dordrecht: Springer, 2007.
WEBSTER, Richard; OLIVER, Margaret A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2nd eded. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2007.

WILKES, P. *et al.* Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, vol. 196, p. 140–153, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.030>.