

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS ARAUJO MOREIRA ROCHA

**DADOS REMOTAMENTE SITUADOS PARA ESTIMATIVA DE ALTURA EM
REMANESCENTE FLORESTAL DE DOIS VIZINHOS - PR**

DOIS VIZINHOS

2026

MATHEUS ARAUJO MOREIRA ROCHA

**DADOS REMOTAMENTE SITUADOS PARA ESTIMATIVA DE ALTURA EM
REMANESCENTE FLORESTAL DE DOIS VIZINHOS - PR**

**Remotely sensed data for estimating tree height in a forest remnant in Dois
Vizinhos, Paraná**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal pela Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Professor Dr. Raoni Wainer Duarte
Bosquilia.

DOIS VIZINHOS

2026



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS ARAUJO MOREIRA ROCHA

**DADOS REMOTAMENTE SITUADOS PARA ESTIMATIVA DE ALTURA EM
REMANESCENTE FLORESTAL DE DOIS VIZINHOS - PR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Florestal da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24 de junho de 2026

Professor Raoni Wainer Duarte Bosquilia
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professora Taciara Zborowski Horst
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professora Carla Talita Pertille
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DOIS VIZINHOS

2026

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, arrimo de minha alma, que, por infinita graça e misericórdia, tem-me abençoado com o fôlego da vida, com laços de sangue e uma família da fé que me servem de suporte, com professores e um orientador munidos de boa vontade e, sobretudo, com uma eterna e inefável esperança.

“Bendito o Deus e Pai de nosso Senhor Jesus Cristo, que, segundo a sua muita misericórdia, nos regenerou para uma viva esperança, mediante a ressurreição de Jesus Cristo dentre os mortos, para uma herança incorruptível, sem mácula, imarcescível, reservada nos céus para vós outros que sois guardados pelo poder de Deus, mediante a fé, para a salvação preparada para revelar-se no último tempo. ”

— 1 Pedro 1:3-5 (Bíblia Sagrada, Versão Almeida
Revista e Atualizada)

RESUMO

Este estudo avaliou a viabilidade técnica e a acurácia do emprego de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e sensores LiDAR integrados a *smartphones* na coleta de dados dendrométricos, comparando-os às metodologias convencionais de inventário florestal. Foram mensuradas as alturas de indivíduos arbóreos utilizando o hipsômetro Vertex (método de referência), o sensor LiDAR de um *smartphone*, utilizando o aplicativo Arboreal e o *Canopy Height Model* (CHM), derivado da subtração do Modelo Digital de Terreno (MDT) pelo Modelo Digital de Superfície (MDS), ambos obtidos por fotogrametria aérea. Os dados foram submetidos à análise estatística não paramétrica por meio do Teste de Friedman ($\alpha = 0,05$), devido à natureza pareada das amostras e à distribuição dos resíduos. Um indivíduo foi excluído por falha na leitura do Vertex, resultando em uma amostra final de 15 indivíduos. Os resultados indicaram que não houve diferença estatisticamente significativa entre as metodologias de medição ($n = 15$; $p = 0,105$), entretanto, as métricas de erro apontaram maior concordância do LiDAR móvel com o Vertex em comparação ao CHM fotogramétrico. O LiDAR apresentou MAE de 0,5867 m e RMSE de 0,7633 m, enquanto o CHM apresentou MAE de 1,3953 m e RMSE de 1,6981 m. Conclui-se que, nas condições avaliadas, o LiDAR em *smartphone* apresentou melhor desempenho para estimativas individuais de altura, enquanto o CHM derivado de VANT mostrou potencial para caracterização espacial do dossel, embora com maior variabilidade em nível de indivíduo.

Palavras-chave: VANT; LiDAR; Inventário Florestal; Sensoriamento Remoto; Fotogrametria; Variáveis dendrométricas.

ABSTRACT

This study evaluated the technical feasibility and accuracy of using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and LiDAR sensors integrated with smartphones for collecting dendrometric data, comparing them to conventional forest inventory methodologies. Tree heights were measured using the Vertex hypsometer (reference method), a smartphone LiDAR sensor via the Arboreal app, and the Canopy Height Model (CHM), derived from subtracting the Digital Terrain Model (DTM) from the Digital Surface Model (DSM) obtained through aerial photogrammetry. The data were subjected to nonparametric statistical analysis using the Friedman test ($\alpha = 0.05$), due to the paired nature of the samples and the distribution of the residuals. One individual was excluded due to a Vertex reading failure, resulting in a final sample of 15 individuals. The results indicated that there was no statistically significant difference between the measurement methodologies ($n = 15$; $p = 0.105$), however, the error metrics showed greater agreement between the mobile LiDAR and Vertex compared to the photogrammetric CHM. LiDAR presented an MAE of 0.5867 m and an RMSE of 0.7633 m, while CHM presented an MAE of 1.3953 m and an RMSE of 1.6981 m. It is concluded that, under the evaluated conditions, smartphone LiDAR sensor performed better for individual height estimates, while UAV-derived CHM showed potential for spatial characterization of the canopy, albeit with greater variability at the individual level.

Keywords: UAV; LiDAR; Forest Inventory; Remote Sensing; Photogrammetry; Dendrometric variables.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Inventário Florestal e Hipsometria	16
3.2	Fundamentos do Sensoriamento Remoto	16
3.3	Aerofotogrametria e uso de VANTs	17
3.4	Tecnologia LiDAR em Dispositivos Móveis	18
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1	Caracterização da Área de Estudo.....	21
4.2	Espécies avaliadas	22
4.3	Fases da pesquisa e abordagem metodológica	22
4.4	Obtenção dos dados hipsométricos.....	25
4.4.1	Método convencional com Vertex.....	25
4.4.2	Sensoriamento Remoto Terrestre (LiDAR).....	25
4.4.3	Aerofotogrametria e Processamento Digital (VANT).....	26
4.5	Análise estatística.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Desempenho do LiDAR (Arboreal Tree) via <i>smartphone</i>	29
5.2	Desempenho do CHM via VANT	31
5.3	Análise estatística e significância.....	35
5.4	Possível Eficiência Operacional do Sensor Móvel.....	38
5.5	Observações complementares.....	39
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Os inventários florestais oferecem informações essenciais para a organização de operações relacionadas à exploração, gestão e preservação de áreas arborizadas, através da obtenção de dados qualitativos e quantitativos sobre os recursos florestais (Lameira, 2023).

A utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de Sensoriamento Remoto permite a rápida atualização das informações sobre determinada área, viabilizando ajustes estratégicos no gerenciamento. Com os avanços na tecnologia de *smartphones* e o surgimento de aplicativos específicos, esses dispositivos também se tornaram ferramentas viáveis para a coleta de dados em ambientes florestais (Wu, 2020).

O uso de dados provenientes de sensores remotos amplia as possibilidades de obtenção de informações florestais. Nesse cenário, o avanço das tecnologias geoespaciais, a exemplo das imagens adquiridas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), popularmente conhecidos como drones, tem se mostrado eficaz para a estimativa de altura de árvores individuais, com resultados de boa exatidão frente aos dados de campo (Florêncio *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025).

A mensuração de altura de indivíduos arbóreos no campo demanda expressivo dispêndio de tempo e recursos humanos (Binoti *et al.*, 2013). Nesse contexto, defende-se que a busca por métodos alternativos de mensuração só se justifica quando acompanhada de avaliação criteriosa da acurácia, pois a eficiência operacional não pode ser conquistada à custa de estimativas imprecisas que comprometam a qualidade do inventário.

Parte-se da hipótese de que o sensor LiDAR embarcado em *smartphone*, por operar como sensor ativo de curto alcance associado a rastreamento por Realidade Aumentada, produz estimativas de altura com menor erro absoluto em relação ao hipsômetro Vertex do que o *Canopy Height Model* (CHM) obtido por fotogrametria aérea via VANT, cuja acurácia individual tende a ser comprometida pela dificuldade do sensor passivo RGB em modelar o terreno sob dossel fechado. Estatisticamente, testou-se a hipótese nula de que não há diferença significativa entre as alturas obtidas pelos três métodos avaliados, frente à hipótese alternativa de que ao menos um dos métodos difere significativamente dos demais.

Diante desse contexto, este estudo visou comparar estimativas de altura total obtidas por três abordagens: hipsômetro Vertex, adotado como referência operacional; sensor LiDAR integrado a *smartphone*, operado pelo aplicativo Arboreal Tree; e *Canopy Height Model* derivado de aerofotogrametria com VANT. A comparação buscou verificar o grau de concordância entre os métodos e identificar limitações associadas ao uso do CHM fotogramétrico e do LiDAR móvel em medições individuais de árvores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar estimativas de altura total de indivíduos arbóreos de um remanescente nativo, obtidas por LiDAR em smartphone e por *Canopy Height Model* (CHM) derivado de VANT, utilizando o hipsômetro Vertex como referência operacional, a fim de identificar o método mais acurado para a estimativa dessa variável.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a existência de diferença estatisticamente significativa entre as alturas estimadas pelo aplicativo Arboreal Tree (LiDAR em smartphone) e as alturas mensuradas pelo hipsômetro Vertex;
- Verificar a existência de diferença estatisticamente significativa entre as alturas extraídas do Canopy Height Model (CHM), derivado do processamento fotogramétrico dos dados de VANT, e as alturas mensuradas pelo hipsômetro Vertex;
- Comparar estatisticamente as alturas obtidas pelos três métodos por meio do teste de Friedman;
- Quantificar e comparar a acurácia do LiDAR móvel e do CHM em relação ao Vertex, por meio do Erro Médio Absoluto (MAE) e da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), identificando o método de menor erro em relação à referência.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inventário Florestal e Hipsometria

O inventário florestal fundamenta-se nos princípios da teoria amostral para estimar atributos quantitativos e qualitativos de uma população arbórea (Péllico Netto; Brena, 1997). No contexto da gestão sustentável, a quantificação de variáveis dendrométricas, como por exemplo, a altura das árvores, é indispensável (Deus, 2024). A altura total (h) é definida como a distância linear entre o nível do solo e o ápice do espécime, mensurada ao longo do seu eixo principal (Machado; Figueiredo Filho, 2003).

Historicamente, a determinação da altura apresenta maior complexidade operacional que a medição de diâmetros. Para mitigar essa dificuldade, o setor florestal adotou hipsômetros eletrônicos que visam conferir agilidade e precisão à coleta de dados (Freitas; Wichert, 1998; De Almeida Gonçalves; Van Eldik; Pokorny, 2009). Entre os instrumentos convencionais, destaca-se o Vertex III, um dispositivo que utiliza pulsos ultrassônicos e princípios trigonométricos para calcular a altura a diversas distâncias, sendo amplamente utilizado como método de referência (Barreiro; Tomé, 2005).

Recentemente, surgiram no mercado uma série de aplicativos para smartphones que permitem a medição da altura das árvores. Essas medições baseiam-se nos dados fornecidos pelo acelerômetro 3D, que indica a inclinação do dispositivo em relação a três eixos (Villasante; Fernandez, 2014).

Neste estudo, o Vertex III foi adotado como referência operacional por sua ampla utilização em mensurações florestais, embora suas medições também estejam sujeitas a erros de visada, posicionamento e experiência do operador. A subjetividade do operador na definição da linha de visada pode gerar um erro médio entre 0,2 e 0,3 m (Vasilescu, 2013). Essa vulnerabilidade, somada às limitações de precisão conforme a altura da árvore aumenta (Silva *et al.*, 2012), tem impulsionado a adoção de tecnologias de Sensoriamento Remoto de alta precisão, como o LiDAR e a fotogrametria por VANTs (Yadav *et al.*, 2023).

3.2 Fundamentos do Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) permite a aquisição de dados sobre alvos sem a necessidade de contato físico, utilizando o registro da radiação eletromagnética

(Rosa, 1990; Weiss; Jacob; Duveiller, 2020). Para a finalidade florestal, destacam-se modalidades que variam conforme a plataforma utilizada, como a aérea (via VANT) e a terrestre (via dispositivos móveis), podendo os sensores serem classificados como ativos ou passivos, dependendo da fonte de energia utilizada (Costa, 2019).

Enquanto o sensor RGB acoplado ao VANT, o qual depende da radiação solar refletida pelo dossel, é classificado como passivo, o sensor LiDAR do *smartphone* opera de forma ativa, emitindo os seus próprios pulsos laser (infravermelho próximo) para mensurar a distância e a intensidade do retorno da energia (reflectância). Essa distinção é crucial, pois sensores ativos emitem sua própria energia e, em sistemas LiDAR aerotransportados, podem registrar informações tridimensionais da estrutura vegetal com menor dependência da iluminação solar direta, facilitando a segregação entre a estrutura da vegetação e o solo (Natural Resources Canada, 2017; Costa, 2019).

No contexto florestal, as propriedades dessa radiação são exploradas, predominantemente, na região do infravermelho próximo (IVP), onde a vegetação apresenta alta reflectância devido à estrutura celular do mesófilo foliar (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2015).

3.3 Aerofotogrametria e uso de VANTs

O termo fotogrametria, o qual deriva do grego, representando algo como 'medir através da luz', é a ciência que permite a reconstrução geométrica de objetos a partir de imagens fotográficas (Tommaselli *et al.*, 1999; Brito; Coelho, 2007). Nesse cenário, o advento dos VANTs surge como uma alternativa para democratizar o acesso a técnicas de alta resolução espacial (Yadav *et al.*, 2023).

Os ortomosaicos e modelos tridimensionais baseados em VANTs têm demonstrado eficácia na estimativa de parâmetros dendrométricos, reduzindo o esforço físico e os riscos inerentes ao trabalho de campo convencional; estudos indicam que as estimativas de altura derivadas de imagens de VANT apresentam forte correlação com os dados obtidos em campo (Soares *et al.*, 2015). Entretanto, a acurácia da fotogrametria aérea para a determinação de alturas individuais depende diretamente da capacidade do algoritmo *Structure from Motion* (SfM) em modelar o terreno sob a copa, um ponto de debate técnico em áreas de dossel fechado (Wallace *et al.*, 2016).

Para obtenção de um modelo que estime a altura das árvores, comumente denominado de *Canopy Height Model* (CHM), após a captação da superfície através das imagens do VANT, as condições do terreno precisam ser eliminadas utilizando um método de filtragem. Em alguns casos, mesmo com a implementação dessa metodologia, poder-se-á obter como produto um modelo impreciso, uma vez que a imagem aérea não consegue penetrar nas copas (Umarhadi *et al.*, 2023).

A representação tridimensional da estrutura florestal obtida pelas imagens do VANT é viabilizada por dois produtos fundamentais:

- Modelo Digital de Superfície (MDS): retrata a elevação de todos os elementos acima do solo, incluindo o topo das copas das árvores e edificações (Cruz *et al.*, 2011);
- Modelo Digital de Terreno (MDT): representa a superfície real do terreno, desprovida de vegetação ou estruturas artificiais (Medina, 2007).

A transição para inventários florestais aprimorados (*Enhanced Forest Inventory*) tem sido viabilizada pela integração de tecnologias avançadas de Sensoriamento Remoto tridimensional. A extração de métricas estruturais por meio dessas ferramentas, como a Fotogrametria Aérea Digital, requer um Modelo Digital de Terreno (MDT) acurado para normalizar as elevações e gerar a altura do dossel, onde a diferença aritmética entre o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o MDT resulta no *Canopy Height Model* (CHM).

Além disso, conforme também apontam White *et al.* (2016), a aplicação dessas tecnologias permite a caracterização espacialmente detalhada de atributos florestais, com acurácia superior aos métodos tradicionais, baseados exclusivamente em amostragem de campo e interpretação visual de fotografias aéreas, atendendo às crescentes demandas operacionais e estratégicas do setor.

Um costume comum dos utilizadores dos VANTs tem sido a otimização da carga útil do sistema, como o principal foco do avanço na implementação de sensores, permitindo a aquisição simultânea de dados através de uma variedade de sensores ativos e passivos, tais como câmeras RGB, câmeras multiespectrais e sensores do tipo *Light Detection and Ranging* (Yadav *et al.*, 2023).

3.4 Tecnologia LiDAR em Dispositivos Móveis

O sistema *Light Detection and Ranging* (LiDAR) representa o estado da arte na aquisição de dados espaciais. Se trata de um sensor remoto ativo e um método

direto de captura de dados, possuindo sua própria fonte de energia — o laser. O sensor emite feixes de laser na banda do infravermelho próximo (IVP) e, através de uma varredura laser, consegue representar, tridimensionalmente e com alta acurácia, a topografia do terreno (Inpe, 2018; Sae-ngow *et al.*, 2025).

A tecnologia LiDAR destaca-se no setor florestal pela propriedade de penetração dos pulsos laser em aberturas do dossel, possibilitando a amostragem do sub-bosque e da superfície do solo. Todavia, a implementação desses sistemas permanece onerosa. Em alternativa, a introdução de sensores LiDAR de consumo em dispositivos iPhone e iPad consolidou o uso de sistemas HLS (*Handheld Laser Scanning*) de baixo custo. Embora o alcance de medição seja menor que o do sensor LiDAR tradicional, o LiDAR do *smartphone* é capaz de medir com precisão (Umarhadi *et al.*, 2023).

O sensor LiDAR presente em *smartphones* calcula o "tempo de voo" (*Time of Flight*) de pulsos infravermelhos que refletem nos objetos da cena e regressam ao sensor, que calcula o tempo de voo para estimar a distância e a profundidade de vários objetos na cena (Chan *et al.*, 2022).

Pesquisas comparativas demonstram que medições realizadas com aplicativos, como o Arboreal, apresentam forte correlação com os resultados do Vertex IV, exigindo menor tempo de treinamento e custo operacional (Sandim *et al.*, 2023). Estudos revelaram em suas análises estatísticas que, após a calibração dos *smartphones*, as medições foram significativamente equivalentes ou melhores do que aquelas realizadas com o Blume Leiss, um dos equipamentos convencionais mais utilizados para estimar a altura de indivíduos arbóreos (Villasante; Fernandez, 2014).

Estudos recentes investigaram o potencial sinérgico da combinação entre o LiDAR terrestre de *smartphones* e a fotogrametria aérea de VANTs, visando modelos de altura de copa (CHMs) mais robustos (Umarhadi *et al.*, 2023; Yadav *et al.*, 2023).

O LiDAR integrado em dispositivos móveis apresenta-se como uma opção prática e confiável para o inventário florestal urbano, permitindo a avaliação precisa de diversos parâmetros dendrométricos com um único aparelho, reduzindo custos e tempo de treinamento. Contudo, a precisão das estimativas de biomassa e área foliar em levantamentos de campo continua dependente de fatores biológicos e de manejo, como a arquitetura da copa, galhos em competição por luz e a presença de danos físicos. Além disso, a tecnologia móvel ainda apresenta limitações operacionais próprias; na criação de mapas 3D, por exemplo, a necessidade de proximidade com

a árvore pode impossibilitar o enquadramento completo de copas muito altas (Pace *et al.*, 2022).

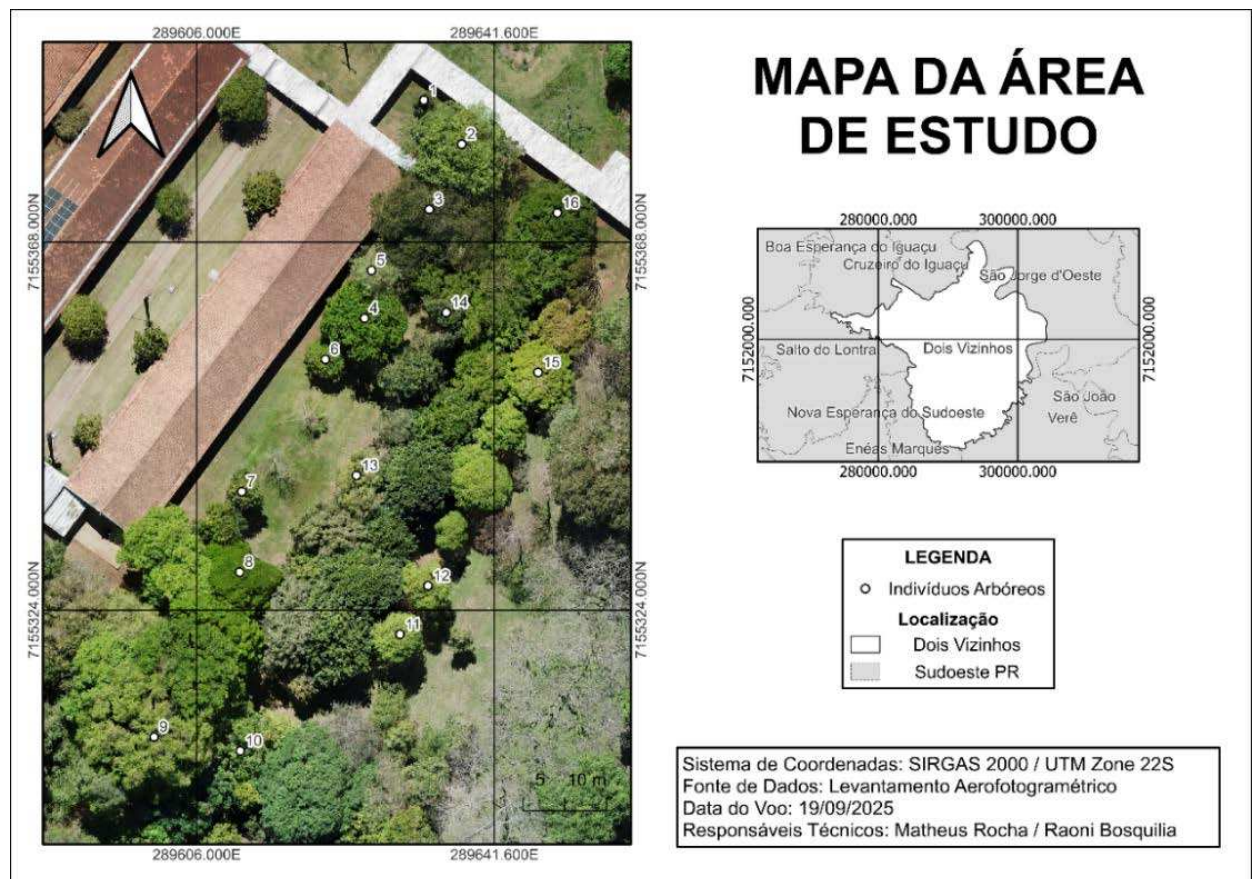
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi conduzido no arboreto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Dois Vizinhos, sob as coordenadas 25° 42' 52" S e 53° 04' 34" W, com altitude média de 519 m. O clima local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa (subtropical úmido), apresentando chuvas bem distribuídas (1.900 a 2.200 mm/ano) e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (Alvares *et al.*, 2013).

O remanescente florestal avaliado possui elevada biodiversidade, com predominância de espécies autóctones da Floresta Ombrófila Mista e Estacional Decidual (Costa *et al.*, 2011).

Figura 1 – Área de Estudo



Fonte: Autoria própria (2026)

4.2 Espécies avaliadas

Para o presente trabalho, resolveu-se avaliar os indivíduos arbóreos constantes na Tabela 1. A escolha foi realizada por amostragem local, além da escolha de melhores locais e posicionamentos para realização da leitura da altura a partir dos métodos escolhidos.

Tabela 1 – Lista dos nomes das espécies avaliadas

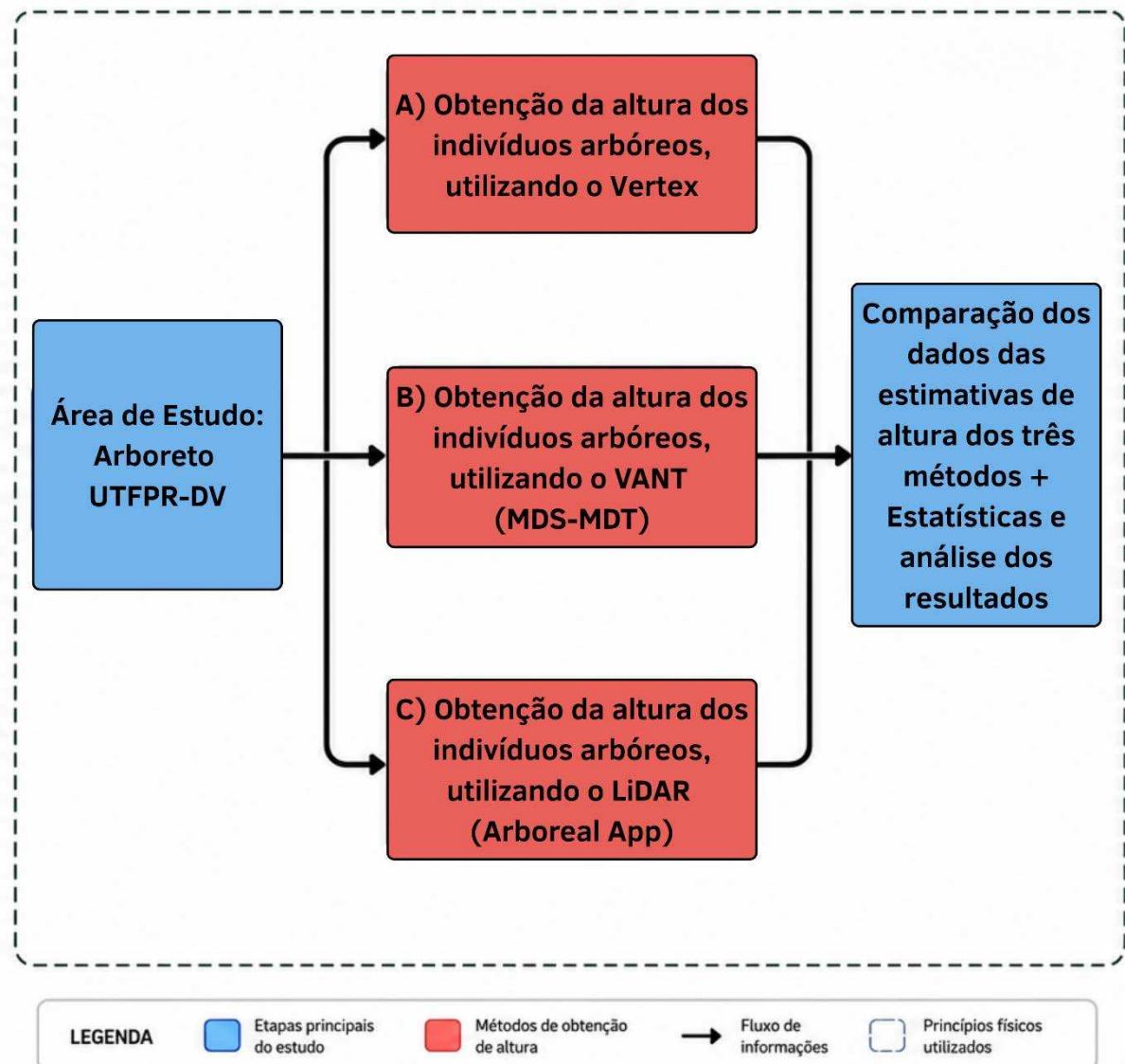
Nome Científico	Família	Nome Popular
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Steud.	<i>Araucariaceae</i>	Pinheiro-do-Paraná
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	<i>Lecythidaceae</i>	Jequitibá-branco
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil., A.Juss. & Cambess.) Ravenna	<i>Malvaceae</i>	Paineira
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	<i>Boraginaceae</i>	Louro-pardo
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud. II	<i>Boraginaceae</i>	Louro-pardo
<i>Eugenia involucrata</i> DC.	<i>Myrtaceae</i>	Cereja do mato
<i>Eugenia involucrata</i> DC. II	<i>Myrtaceae</i>	Cereja do mato
<i>Eugenia involucrata</i> DC. III	<i>Myrtaceae</i>	Cereja do mato
<i>Eugenia uniflora</i> L.	<i>Myrtaceae</i>	Pitangueira
<i>Eugenia uniflora</i> L. II	<i>Myrtaceae</i>	Pitangueira
<i>Eugenia uniflora</i> L. III	<i>Myrtaceae</i>	Pitangueira
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	<i>Bignoniaceae</i>	Ipê-roxo
<i>Nectandra lanceolata</i> Nees & Mart.	<i>Lauraceae</i>	Canela-amarela
<i>Ocotea porosa</i> (Nees & Mart.) Barroso	<i>Lauraceae</i>	Imbuia
<i>Ocotea porosa</i> (Nees & Mart.) Barroso II	<i>Lauraceae</i>	Imbuia
<i>Prunus myrtifolia</i> (L.) Urb.	<i>Rosaceae</i>	Pessegueiro-bravo

Fonte: Autoria própria (2026)

4.3 Fases da pesquisa e abordagem metodológica

O fluxograma das etapas de trabalho e os princípios físicos das metodologias utilizadas no estudo se encontram apresentados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Fluxograma das etapas de trabalho



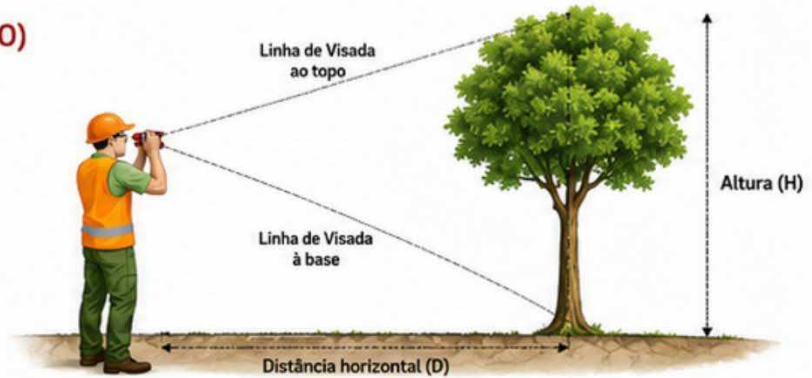
Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 3 – Princípios físicos das metodologias utilizadas no estudo

A) VERTEX (HIPSÔMETRO)

Baseado na trigonometria.

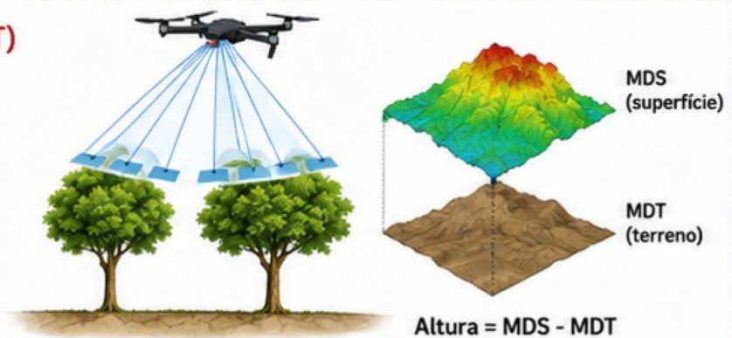
O equipamento mede o ângulo entre a linha de visada e o topo e a base da árvore, e calcula a altura com base na distância horizontal.



B) FOTOGRAMETRIA (MDS-MDT)

Baseada na estereoscopia.

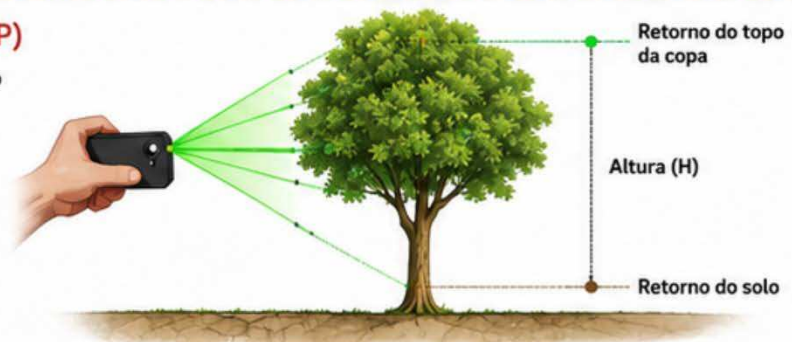
Imagens aéreas com sobreposição são processadas para gerar um Modelo Digital de Superfície (MDS) e um Modelo Digital de Terreno (MDT). A altura da árvore é obtida pela diferença entre os modelos.



C) LiDAR (ARBOREAL APP)

Baseado no princípio do tempo de voo (ToF).

O laser emite pulsos que refletem nas superfícies (vegetação e solo). A altura da árvore é calculada pela diferença entre o retorno do topo da copa e do solo.



Fonte: Autoria própria (2026)

4.4 Obtenção dos dados hipsométricos

4.4.1 Método convencional com Vertex

Para a obtenção dos dados de referência, utilizou-se o hipsômetro ultrassônico Haglöf Vertex III. O protocolo de medição consistiu no posicionamento do transponder (emissor de sinal) no tronco da árvore a uma altura fixa de 1,30 m. O instrumento opera através de ondas de 25 kHz, determinando a distância da linha de base via tempo de resposta entre o receptor e o transponder, o que elimina erros de trena em terrenos acidentados (Parker *et al.*, 2005).

As leituras foram realizadas a uma distância horizontal aproximadamente igual à altura total estimada da árvore, com uma média de 12,5m, para minimizar erros angulares. Para cada um dos indivíduos da amostra, realizaram-se de três a quatro medições sucessivas, adotando-se a média aritmética como o valor final de altura total (h), garantindo a mitigação de oscilações na visada do operador (Kitahara; Mizoue; Yoshida, 2009).

Durante a campanha de campo, o indivíduo ID 5 (*Cordia trichotoma* II) apresentou falha sistemática de leitura no hipsômetro Vertex, possivelmente devido a interferências no sinal ultrassônico em sub-bosque denso. Após múltiplas tentativas de medição sem sucesso, este indivíduo foi excluído das análises estatísticas, resultando em uma amostra final composta por 15 árvores.

4.4.2 Sensoriamento Remoto Terrestre (LiDAR)

As medições via dispositivo móvel foram realizadas com um iPhone 13 Pro (Apple Inc., Los Altos, Califórnia, EUA) equipado com sensor LiDAR, através do aplicativo *Arboreal Tree* (Arboreal AB, Umea, Suécia), nas mesmas árvores cujas alturas haviam sido medidas pelo método de referência.

A flexibilidade do aplicativo *Arboreal* dispensou o estabelecimento rigoroso da distância horizontal exata (necessária em métodos trigonométricos tradicionais). Embora a distância adotada fosse aproximadamente igual à altura da árvore, seguindo recomendação de Lindberg (2020), a tecnologia de *tracking* via Realidade Aumentada aliada ao sensor LiDAR, permitiu certa margem de mobilidade ao operador sem comprometer o fechamento do triângulo de medição, eliminando o erro sistemático da definição da linha de base rígida.

O procedimento consistiu na calibração do sensor ao nível do solo, seguida pela marcação da base do tronco e do ápice da copa via interface de Realidade Aumentada. O sensor calcula o “tempo de voo” (ToF) de pulsos infravermelhos para derivar a distância vertical (Chan *et al.*, 2022).

A técnica apresenta limitações em ambientes de baixa luminosidade ou condições climáticas adversas, uma vez que a interface de Realidade Aumentada depende da detecção de feições visuais pelas câmeras do dispositivo, para que haja o correto rastreamento espacial (Sae-ngow *et al.*, 2025). Ainda que Lindberg (2020) tenha utilizado o aplicativo apenas com a tecnologia de Realidade Aumentada, ou seja, sem o sensor LiDAR, afirmou que o *Arboreal* é uma ferramenta adequada para aquisição de dados florestais na silvicultura prática, com alta exatidão e precisão, relatando que a escuridão não é um fator limitante na utilização prática do aplicativo, visto que o trabalho raramente é exercido em condições muito escuras.

4.4.3 Aerofotogrametria e Processamento Digital (VANT)

O levantamento aéreo foi executado com um VANT DJI Mavic Pro, equipado com sensor CMOS de 12.4 MP. O plano de voo foi configurado com velocidade de 6,4 m/s e altura de 60 m, resultando em um GSD (*Ground Sample Distance*) inferior a 3 cm. O recobrimento (*overlap*) foi estabelecido em 80% longitudinal e 80% lateral, garantindo redundância fotogramétrica para a reconstrução 3D.

O céu possuía nebulosidade esparsa, com sol continuamente visível e livre de obstrução por nuvens durante todo o período de aquisição das imagens, o que assegurou iluminação direta e funcionalmente constante ao longo do voo. Quanto ao regime de vento, observaram-se rajadas esporádicas de baixa intensidade, sem caracterização instrumentada, compatíveis com brisa leve (grau 1-2 da escala Beaufort).

O processamento das imagens foi realizado no *software open-source Open Drone Map* (ODM). A geração da estimativa de altura seguiu as etapas de:

- Geração da Nuvem de Pontos: via algoritmos de *Structure from Motion* (SfM);
- Criação do Modelo Digital de Superfície (MDS): representando o topo do dossel;
- Classificação de nuvem de pontos para extração da altitude do terreno (*Ground Filtering*): etapa necessária para a Geração do Modelo Digital de Terreno

(MDT), na qual aplicou-se um algoritmo de filtragem que identifica os retornos de menor altitude em janelas móveis, para interpolar a superfície topográfica real abaixo da vegetação;

- Cálculo do CHM: O *Canopy Height Model* foi obtido pela álgebra matricial ($CHM = MDS - MDT$). A extração das alturas individuais foi realizada por meio da técnica de Estatística Zonal (*Zonal Statistics*), utilizando polígonos vetorizados manualmente via *software* QGIS, utilizando a projeção das copas como zonas de análise. Para cada indivíduo, extraiu-se o valor máximo (pico) contido na respectiva zona, garantindo que a altura total (h) correspondesse ao ápice real da árvore, semelhante a metodologia utilizada por Umarhadi *et al.* (2023);
- Para a representação espacial e, principalmente, do gradiente de alturas, os dados foram submetidos a uma classificação colorimétrica (Figura 5) e as coordenadas foram projetadas no sistema SIRGAS 2000 / UTM zone 22S.

A classificação da nuvem de pontos para a extração da altitude do terreno (*Ground Filtering*), consistiu na filtragem dos pontos acima do terreno para a geração do Modelo Digital de Terreno (MDT). Devido à característica estrutural do arboreto, cuja distribuição espacial apresenta clareiras entre as copas, o sensor óptico passivo foi capaz, com ressalvas, de registrar a superfície do terreno.

Diante disso, aplicou-se um algoritmo de filtragem morfológica (Zhang *et al.*, 2003) baseado em janelas móveis, que identifica iterativamente os pontos de menor cota altimétrica registrados nos espaços do dossel. Estes pontos serviram como âncoras locais para interpolar a superfície topográfica contínua abaixo da vegetação, fornecendo o MDT basilar exigido para a posterior normalização do Modelo Digital de Superfície e extração das alturas (White *et al.*, 2016).

4.5 Análise estatística

Para a comparação das alturas obtidas pelos três métodos de mensuração (Vertex, LiDAR e VANT), os dados foram submetidos ao teste não paramétrico de Friedman ($\alpha = 0,05$). A escolha desse teste justifica-se pela natureza dependente das amostras, visto que os três sensores foram aplicados sobre os mesmos indivíduos arbóreos ($n = 15$). As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R, utilizando o pacote *rstatix* para a execução do teste e o pacote *ggplot2* para a apresentação dos resultados.

Para quantificar a precisão de cada método em relação ao padrão Vertex, calcularam-se o Erro Médio Absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root of the Mean Square Error*), seguindo as equações:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_{vertex} - h_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{vertex} - h_i)^2}$$

Onde: h_i : altura estimada pelo método i ; e h_{vertex} : altura de referência.

Se o teste de Friedman indicasse uma diferença significativa (p-valor baixo), o próximo passo seria rodar um teste post-hoc (Wilcoxon Pareado) para identificar quais pares de metodologias são diferentes entre si (por exemplo, Vertex vs. Arboreal, Vertex vs. MDS-MDT, etc.). Porém, como o teste indicou concordância entre os métodos ($p = 0,105$), a análise foi concluída.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desempenho do LiDAR (Arboreal Tree) via *smartphone*

A comparação entre as alturas obtidas via sensor LiDAR (aplicativo *Arboreal Tree*) e o método de referência (Vertex III) demonstrou uma alta consistência nos dados. Para a maioria dos indivíduos amostrados, a variação absoluta situou-se em patamares reduzidos, com destaque para a Paineira (*Ceiba speciosa*) (ID 4), na qual ambas as metodologias registraram exatos 14,1 m. No indivíduo de maior porte, Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis*), o LiDAR indicou 20,1 m frente aos 19,7 m do Vertex, uma diferença de apenas 2% (Tabela 2).

Tabela 2 - Alturas estimadas das espécies para cada metodologia

ID	Espécie	Vertex	Arboreal	CHM
1	<i>Araucaria angustifolia</i>	10,00	9,10	9,00
2	<i>Cordia trichotoma</i>	19,60	20,20	16,61
3	<i>Prunus myrtifolia</i>	14,70	14,50	12,70
4	<i>Ceiba speciosa</i>	14,10	14,10	13,80
5	<i>Cordia trichotoma II</i>	-	14,70	12,23
6	<i>Eugenia uniflora</i>	6,30	5,40	5,34
7	<i>Nectandra lanceolata</i>	10,20	8,60	8,11
8	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	16,80	15,10	15,23
9	<i>Cariniana estrellensis</i>	19,70	20,10	22,82
10	<i>Ocotea porosa</i>	15,00	14,60	17,44
11	<i>Eugenia involucrata</i>	13,20	12,70	11,10
12	<i>Eugenia involucrata II</i>	12,20	12,00	11,76
13	<i>Ocotea porosa II</i>	11,30	11,10	11,24
14	<i>Eugenia involucrata III</i>	11,10	11,20	11,76
15	<i>Eugenia uniflora II</i>	9,10	9,60	8,41
16	<i>Eugenia uniflora III</i>	7,50	8,10	8,01

Fonte: Autoria própria (2026)

* O indivíduo ID 5 (*Cordia trichotoma II*) apresentou falha de leitura no Vertex e foi excluído da análise estatística final (n = 15), sendo mantido na tabela apenas para registro metodológico completo e preservação da altura coletada via *Arboreal Tree*®

Diferentemente dos métodos tradicionais que exigem instrumentos separados para DAP e altura, além de uma segunda pessoa para auxiliar na leitura e registro, o sistema via *smartphone* permite que um único operador realize todas as medições (Sae-ngow *et al.*, 2025).

A proximidade nos resultados obtidos via *smartphone* foi demonstrada na Figura 4. Conforme documentado por Vasilescu (2013), o Vertex III, apesar de sua alta resolução eletrônica, é susceptível ao erro humano na definição da linha de visada, o que pode gerar desvios entre 0,2 e 0,3 m. Os resultados deste estudo corroboram essa tese, sugerindo que as variações encontradas entre o LiDAR e o Vertex estão dentro da margem de erro intrínseca ao fator humano.

Lindberg (2020) mostrou que, embora o uso do aplicativo *Arboreal* apresente precisão ligeiramente inferior ao Vertex em condições ideais de visibilidade, ambos apresentam resultados consistentes. A precisão superior observada por ela em relação aos estudos de Luoma *et al.* (2017), sugere que a consistência do observador é um fator determinante na redução do erro experimental, superando até mesmo variações instrumentais.

Embora o Vertex III seja o método comumente utilizado, sua precisão é intrinsecamente ligada à experiência do operador. Conforme demonstrado por Wertz *et al.* (2026), usuários novatos apresentam uma precisão de 2,5 a 3,5 vezes menor que operadores experientes, apresentando uma tendência sistemática de subestimar a altura em cerca de 1,7%. Esse dado justifica as variações encontradas neste estudo e reforça que a automação do sensor LiDAR (via *Arboreal Tree*) apresenta um potencial para mitigar essa instabilidade humana durante a aferição.

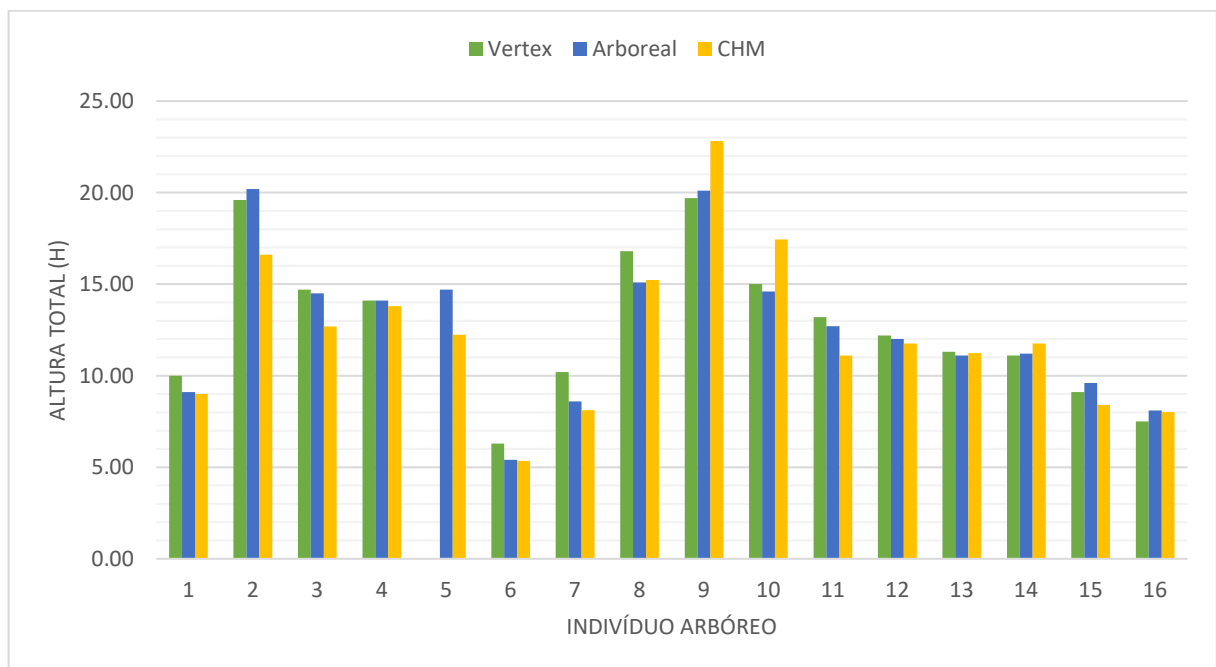
O sensor ativo do *smartphone* não apresentou dificuldades impostas por irregularidades topográficas (microrelevo). Em tais condições, hipsômetros baseados no método da tangente, induzem o operador a erros de visada e deslocamento do eixo vertical de referência, gerando distorções trigonométricas que podem subestimar ou superestimar a altura real da árvore em até 42% (Bragg, 2007).

Esta acurácia observada no levantamento terrestre é fundamentada na emissão ativa via VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*), que permite ao sensor operar em regime de dToF (*direct Time of Flight*). A tecnologia dToF apresenta alta robustez frente a variações de luminosidade e contraste ambiental — fatores que limitam a acurácia de sensores passivos —, garantindo a geração de nuvens de pontos com erro centimétrico, independentemente das condições de iluminação direta ou sombreamento do dossel (Luetzenburg; Kroon; Bjørk, 2021).

A falha na leitura ultrassônica do Vertex no indivíduo ID 5 (*Cordia trichotoma* II) pode ser uma demonstração da suscetibilidade acústica do equipamento em sub-bosques densos. Em contraste, o sensor LiDAR do *smartphone* conseguiu aferir a

altura. Isso ocorre pois o pulso laser é constituído por feixes estreitos e altamente colimados, sendo capaz de penetrar os espaços (*gaps*) no dossel ou sub-bosque (Kraus; Pfeifer, 1998). Por outro lado, as ondas de alta frequência emitidas pelo hipsômetro ultrassônico — operando a 25 kHz (Parker *et al.*, 2005) — sofrem severa atenuação, absorção e espalhamento (*scattering*) físico quando encontram anteparos densos como ramificações e folhagens de sub-bosque interpostas na linha de visada (Price; Attenborough; Heap, 1988).

Figura 4 – Altura total (h) em metros para os 16 indivíduos do arboreto, pelos métodos Vertex (referência), LiDAR (App Arboreal Tree) e Canopy Height Model (CHM)



Fonte: Autoria própria (2026)

5.2 Desempenho do CHM via VANT

A ausência de pontos de controle no terreno (GCPs) no georreferenciamento do levantamento aerofotogramétrico constitui uma limitação metodológica que compromete a acurácia posicional absoluta do modelo, sobretudo na componente vertical. Sanz-Ablanedo *et al.* (2018) demonstram que, na ausência de controle terrestre suficiente e bem distribuído, o ajuste de feixes tende a gerar uma superfície de erro sistemático não-linear (efeito de "domo"), cuja magnitude nos pontos de checagem pode superar 1 m e, em configurações com poucos GCP mal distribuídos, aproximar-se de 8 m. De forma convergente, Dandois e Ellis (2013) relatam que o georreferenciamento baseado exclusivamente na trajetória GNSS da aeronave

produziu acurácia vertical (RMSEz de 1,2 a 4,7 m) sensivelmente inferior à obtida com uso de GCP (RMSEz de 0,4 a 0,6 m).

Essa limitação, contudo, não é a principal fonte de incerteza para a estimativa de altura de dossel neste estudo. Como o efeito de domo descrito por Sanz-Ablanedo *et al.* (2018) constitui uma deformação espacialmente variável, e não um deslocamento vertical uniforme, seu cancelamento na operação $CHM = MDS - MDT$ não pode ser assumido de forma generalizada. Mais relevante e mais consistentemente documentada na literatura é a limitação estrutural da fotogrametria SfM em reconstruir o terreno sob dossel fechado, independentemente da estratégia de georreferenciamento adotada.

Wallace *et al.* (2016) constataram que a superfície de terreno reconstruída por SfM sob copas apresentou diferença média de 0,12 m em relação ao MDT de referência obtido por varredura a laser aerotransportada, contra apenas 0,05 m em áreas não ocluídas, com densidade de pontos de solo de aproximadamente 0,5 pontos/m² sob dossel (resultado da oclusão geométrica do terreno em múltiplos ângulos de visada).

De forma convergente, Dandois e Ellis (2013) demonstram que a acurácia vertical do MDT obtido sob condição de folhagem plena (*leaf-on*) foi substancialmente inferior à obtida sob condição sem folhas (*leaf-off*) (RMSEz de 2,49-5,69 m contra 0,89-3,04 m), o que degradou diretamente a capacidade preditiva do CHM (R^2 caindo de 0,82-0,84 para 0,62-0,67 ao se substituir o MDT de referência pelo MDT (*leaf-on*)). Esse padrão é consistente com a limitação estrutural apontada por Iglhaut *et al.* (2019), segundo a qual a fotogrametria está intrinsecamente restrita à reconstrução de superfícies visíveis nas imagens, fornecendo informação confiável de terreno apenas onde existem clareiras no dossel.

Diferentemente do LiDAR terrestre, o *Canopy Height Model* (CHM), derivado do processamento fotogramétrico do VANT, apresentou maior variabilidade e casos de subestimativa e superestimativa acentuadas (Tabela 2). No indivíduo Louro Pardo (*Cordia trichotoma*) (ID 2), o VANT registrou 16,6 m, enquanto o Vertex indicou 19,6 m. Inversamente, para o Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis*) (ID 9), o VANT superestimou a altura em 3,1 m (22,8 m vs. 19,7 m).

A superestimativa observada no indivíduo ID 9 pode ser justificada pelo fato de que o algoritmo *Structure from Motion*, ao processar sensores passivos, pode gerar ruídos e artefatos de reconstrução em ápices agudos sujeitos a deslocamento por

vento. O movimento da vegetação quebra a consistência espacial exigida pelo algoritmo para o emparelhamento de imagens, elevando o MDS além do topo real da copa, um fenômeno já documentado em levantamentos fotogramétricos sob condições de vento (Slade *et al.*, 2025).

Embora o indivíduo ID 9 tenha apresentado uma superestimativa que pode ser decorrente de artefatos de reconstrução do algoritmo SfM sob efeito do vento, é importante salientar que o levantamento aéreo via CHM oferece vantagens metodológicas estruturais para a análise do estrato dominante.

Em florestas nativas heterogêneas, as medições de altura total obtidas por métodos terrestres, incluindo hipsômetros convencionais (Vertex) e aplicações de posicionamento óptico, são frequentemente comprometidas pelo efeito de oclusão do dossel (Schweizer *et al.*, 2024). Conforme demonstrado por Larjavaara e Muller-Landau (2013), operadores no solo tendem a subestimar árvores altas devido à incapacidade física de visualizar o ápice real através da densidade foliar, resultando em visadas equivocadas em galhos periféricos.

Sob a perspectiva aérea, este cenário de oclusão é mitigado. Indivíduos maduros e de grande porte emergem do dossel florestal, oferecendo condições ótimas de exposição geométrica que facilitam sua discriminação estrutural pelos sensores embarcados em VANT (Pertille *et al.*, 2024). Assim, ressaltados os possíveis ruídos cinemáticos causados pelo vento, o CHM consolida-se como uma ferramenta de alta capacidade visual para o inventário de árvores emergentes, contornando as severas limitações de linha de visada que afetam os instrumentos operados no nível do solo.

Em 60% dos casos o CHM subestimou os dados de altura em relação aos outros dois métodos de campo. Ao comparar especificamente com o Vertex, a subestimação ocorreu em 73,3% dos casos, reforçando a tendência de subestimação da altura pelo sensor passivo.

Essa inconsistência é fundamentada pela natureza passiva do sensor RGB embarcado no Mavic Pro. A fotogrametria baseada no algoritmo *Structure from Motion* (SfM) apresenta limitações intrínsecas na penetração de dosséis densos. Em indivíduos de grande porte, a incapacidade do sensor passivo em registrar o solo sob a projeção da copa compromete a fidedignidade do Modelo Digital de Terreno (MDT). Como a oclusão foliar impede que o *software* estabeleça pontos de paridade no nível do terreno, o MDT é gerado por interpolação a partir de clareiras adjacentes. Esse fenômeno frequentemente eleva artificialmente a cota do solo e, conseqüentemente,

resulta na subestimação da altura total (h) da árvore (Iglhaut *et al.*, 2019; Wallace *et al.*, 2016).

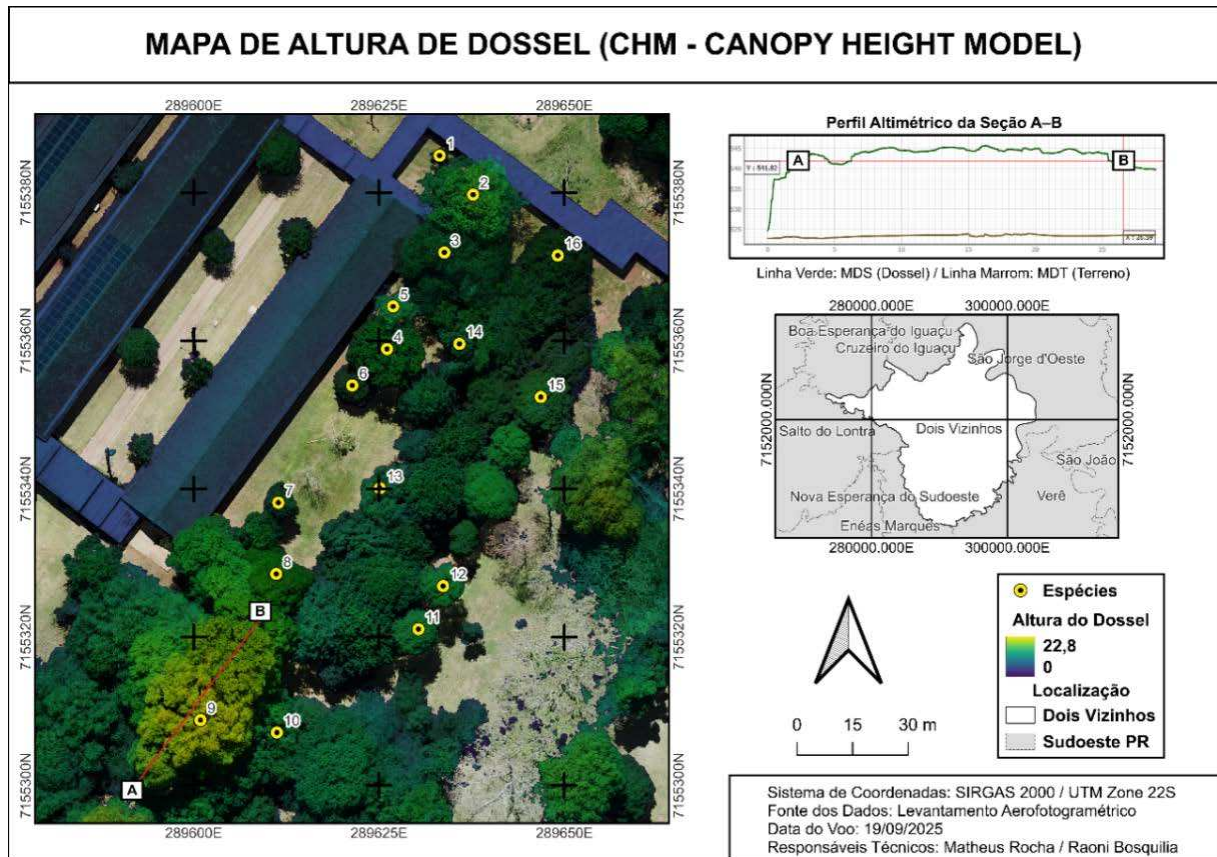
A possível dificuldade de penetração do sensor passivo RGB no dossel observada neste estudo, é validada por Cao *et al.* (2019), que demonstram que nuvens de pontos de aerofotogrametria digital limitam-se majoritariamente ao topo das copas, falhando em caracterizar a estratificação vertical e o solo em áreas de alta densidade foliar.

Apesar dos resultados do Teste de Friedman ($p = 0,105$), a tendência de subestimação do CHM em relação ao Vertex não deve ser ignorada. Esta proximidade numérica indica que, para a densidade de dossel desta amostra, a interpolação do MDT via SfM foi suficiente para a inferência, mas reforça o alerta sobre a fragilidade desta metodologia em áreas com fechamento de copa superior, onde a ausência de 'gaps' impediria o registro do solo real.

A tecnologia de imagem não fornece o mesmo nível de penetração no dossel que, por exemplo, a varredura a laser de sensores ativos aerotransportados e, portanto, não pode entregar o mesmo nível de informação sobre a estratificação vertical das camadas de vegetação e do terreno (Wallace *et al.*, 2016; Torres; Tommaselli, 2018). Em contrapartida, a acurácia dos modelos VANT-SfM é consistente em muitos tipos diferentes de florestas e em uma escala similar aos modelos de digitalização aérea por laser (Iglhaut *et al.*, 2019).

A consistência dos modelos gerados é verificada no perfil A-B (Figura 5), onde a estrutura vertical da árvore ID 9 é representada. Esta lógica visual corrobora os resultados do teste de Friedman, que indicou não haver diferença significativa entre as alturas estimadas pelo CHM e as obtidas pelo método de referência Vertex.

Figura 5 – Mapa colorimétrico de altura do dossel



Fonte: Autoria própria (2026)

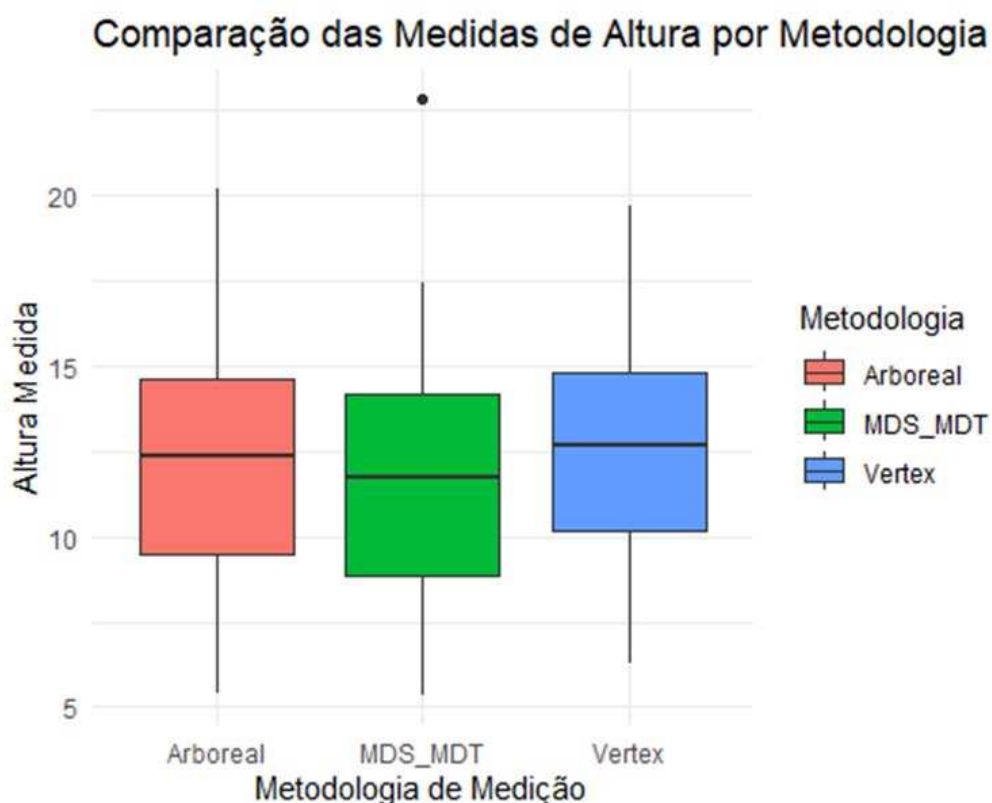
5.3 Análise estatística e significância

A análise estatística foi conduzida com amostra final de $n = 15$, após exclusão do indivíduo ID 5 por ausência de dado de referência (Vertex). O Teste de Friedman foi aplicado com nível de significância $\alpha = 0,05$, conforme protocolo para amostras pareadas, resultando em $p = 0,105$, indicando ausência de diferença estatisticamente significativa entre os métodos ($p > 0,05$).

A distribuição dos dados, conforme observado no *boxplot* (Figura 6), mostra que o LiDAR apresenta mediana próxima a do Vertex, enquanto o CHM apresenta maior dispersão, evidenciando a variabilidade inerente dos métodos de interpolação de terreno em fotogrametria passiva.

Embora o VANT apresente maior dispersão, a concordância técnica reforça a conclusão de Cao *et al.* (2019) de que, apesar das diferenças de densidade de nuvem, os dados passivos de VANT em fotogrametria aérea digital são ferramentas úteis e comparáveis ao LiDAR para o inventário de precisão em florestas.

Figura 6 – Gráfico Boxplot gerado com base no Teste de Friedman



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Devido ao tamanho amostral ($n = 15$), o Teste de Friedman não evidenciou diferenças estatísticas significativas entre os métodos avaliados ($p = 0,105$). Contudo, a ausência de significância estatística neste cenário atua apenas como indicativo preliminar. A avaliação mais contundente do desempenho dos sensores deve focar nas métricas de erro absoluto. Nesse contexto, o LiDAR móvel destacou-se com um Erro Médio Absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*) de 0,59 m e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root of the Mean Square Error*) de 0,76 m, evidenciando maior acurácia prática frente ao VANT.

A análise do gráfico de *boxplot* revelou que as medianas do LiDAR e do Vertex se mostraram quase coincidentes, enquanto a dispersão dos dados do VANT se mostrou superior. Isso demonstra que, ainda que o VANT possa ser utilizado para estimativas populacionais e de larga escala, sua aplicação para inventários de precisão individualizado ainda demanda implementação de pontos de controle, refinamento nos algoritmos de filtragem de solo ou o uso de sensores ativos aerotransportados.

A precisão de cada método foi quantificada através das métricas de erro apresentadas na Tabela 3. O sensor LiDAR apresentou Erro Médio Absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*) de 0,5867 m e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root of the Mean Square Error*) de 0,7633 m, enquanto o CHM apresentou MAE de 1,3953 m e RMSE de 1,6981 m. Esses valores confirmam, nas condições de avaliação do estudo, a superioridade do sensor ativo terrestre (LiDAR) em relação à fotogrametria aérea para medições individuais de altura.

Tabela 3 - Métricas de erro dos métodos em relação ao Vertex

Métrica	MAE (<i>Mean Absolute Error</i>)	RMSE (<i>Root of the Mean Square Error</i>)
LiDAR (Arboreal)	0,5867m	0,7633m
CHM	1,3953m	1,6981m

Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados baseados nas medições de altura das árvores, obtidos pelo smartphone equipado com LiDAR (Aplicativo *Arboreal*), em comparação com o Vertex, no trabalho de Pace *et al.* (2022), mostraram uma forte correlação (valor r de 0,95).

Haruna, Iliyasu e Finchiwa (2025), ao compararem valores de altura de árvores obtidos com o aplicativo *Arboreal* com aqueles obtidos com o método tradicional manual (clinômetro), obtiveram valores P (valor- p) de 0,14, 0,07 e 0,08. Observando que todos os valores P eram superiores ao nível de significância comum de 0,05, sendo consoante ao presente estudo, afirmando não existir diferença significativa entre os dados obtidos utilizando o LiDAR móvel e a metodologia tradicional para indivíduos arbóreos.

Lindberg (2020), em seu trabalho que comparou o aplicativo *Arboreal* com o hipsômetro Vertex, obteve RMSE de 3,0% (0,5 m) para as medições de altura, apresentando subestimação sistemática de -1,4% (-0,2 m). Tanto o Vertex quanto o *Arboreal* superestimaram sistematicamente a altura. A dispersão foi ligeiramente maior ao usar o aplicativo, com um desvio padrão de 0,2 m, em comparação com o valor correspondente de 0,1 m para o Vertex. O RMSE relativo na medição de altura foi calculado em 1,1% com o *Arboreal* e 0,7% com o Vertex em relação à altura real da árvore, obtida após o corte e a medição da altura.

É importante salientar que, no trabalho supramencionado, foi utilizada uma amostra quantitativamente maior que a do presente estudo, entretanto, a versão do

aplicativo utilizada na avaliação não fez uso do sensor LiDAR móvel lançado no mesmo ano (ARBOREAL, 2026), o qual potencializaria a acurácia das aferições de altura via aplicativo.

5.4 Possível Eficiência Operacional do Sensor Móvel

Embora este não tenha sido o foco do estudo, a ausência de dados não elimina a evidente disparidade de custo e celeridade nas medições que o smartphone com sensor LiDAR apresenta em comparação com os demais métodos.

Lindberg (2020) apontou a superioridade do aplicativo Arboreal no que tange à velocidade na medição de altura. Ao usar o aplicativo, cerca de um terço do tempo total de trabalho foi dedicado à medição de altura, em comparação com a medição convencional com Vertex, onde essa etapa representou cerca de metade do tempo gasto. Em todos os casos, a medição de altura foi realizada mais rapidamente com o aplicativo.

Uma vantagem adicional, como apontaram Hernández-Moreno, Pérez-Salicrup e Velázquez-Martínez (2025), é que apenas uma pessoa é necessária para a realização das medições e registro dos dados, ao contrário dos métodos tradicionais, os quais requerem, no mínimo, duas pessoas e a captura das informações de campo no escritório, resultando num maior consumo de tempo e de pessoal administrativo. Entretanto, devem ser consideradas as condições e extensão da floresta analisada.

As múltiplas aferições para estabilizar a média e calibração constante do transponder, expõem a morosidade do Vertex. Wertz *et al.* (2026) destacam que a dificuldade em manter o instrumento estável enquanto se fixa o alvo é uma das principais fontes de incerteza em medições terrestres convencionais. A interface de Realidade Aumentada em conjunto com o laser LiDAR utilizados no Arboreal, portanto, não apenas agiliza o processo através da coleta de dados com apenas uma visada na maioria dos espécimes, mas remove o gargalo da fadiga, além de mitigar a subjetividade do operador e o tempo na seleção de superfícies menos sinuosas.

Enquanto a análise estatística não evidenciou diferença significativa entre os métodos, o ganho de eficiência operacional tornar-se-á o fator decisivo para a adoção da tecnologia. Pace *et al.* (2022) reportaram que métodos tradicionais com múltiplos instrumentos (caliper, hipsômetro, trena) demandam entre 30 a 60 minutos por parcela, com custos significativamente superiores.

Ao avaliar o tempo despendido na coleta de dados em campo, Sandim *et al.* (2023) constataram uma redução drástica no tempo de medição com o uso de aplicativos móveis em detrimento das metodologias convencionais. No estudo conduzido pelos autores, o método tradicional exigiu um tempo médio de 28,7 minutos para a conclusão de uma parcela amostral.

Em contrapartida, a utilização do aplicativo *Arboreal* reduziu esse tempo para apenas 11,7 minutos por parcela. Essa otimização, que representa um ganho de agilidade superior a 50%, demonstra que a adoção de sensores móveis não apenas reduz o tempo operacional enquanto preserva a viabilidade técnica do levantamento, mas atua como um fator decisivo na redução de custos logísticos, na diminuição da curva de aprendizado e na mitigação da fadiga da equipe de campo, incentivando a tendência de simplificação dos inventários florestais urbanos e rurais.

Essa economia de tempo, aliada à acurácia dos dados, posiciona o LiDAR móvel como uma tecnologia disruptiva para a otimização de recursos em inventários florestais, corroborando as perspectivas de Umarhadi *et al.* (2023).

5.5 Observações complementares

Este estudo apresenta observações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados:

Tamanho amostral: Estudos futuros devem ampliar o tamanho amostral ($n \geq 30$), considerando que o poder estatístico de testes não paramétricos para detectar diferenças sutis é limitado em pequenas amostras (Siegel; Castellan Jr., 2006).

Tipologia florestal única: A validação foi conduzida exclusivamente em fragmento de Floresta Ombrófila Mista. A extrapolação dos resultados para outros biomas (Floresta Estacional, Cerrado, Amazônia, Caatinga) requer validação específica, dado que a estrutura de dossel e densidade de sub-bosque afetam diretamente o desempenho dos sensores.

Condições climáticas controladas: As medições foram realizadas em condições de luminosidade plena e ausência de precipitação. O desempenho do LiDAR smartphone em dias nublados, crepusculares ou com chuva leve não foi testado, apesar da conhecida limitação da interface de Realidade Aumentada em baixa luminosidade (Sae-ngow *et al.*, 2025).

Ausência de validação temporal: Não foi avaliada a consistência das medições em diferentes estações do ano ou estágios fenológicos, o que pode

influenciar especialmente as estimativas do VANT em espécies decíduais durante o período de queda foliar.

Operador: A concordância encontrada ($p = 0,105$) deve ser interpretada sob a ótica da curva de aprendizado inerente ao uso de hipsômetros ultrassônicos. Conforme demonstrado por Wertz *et al.* (2026), operadores com nível de proficiência inicial podem apresentar uma precisão até 3,5 vezes menor que especialistas. Assim, os resultados sugerem que as geotecnologias testadas (LiDAR e VANT) demonstram robustez mesmo quando comparadas a um método de referência operado sob as limitações típicas de um operador em fase de treinamento.

Embora o *Canopy Height Model* (CHM) derivado de fotogrametria aérea tenha apresentado a maior variabilidade (RMSE = 1,6981 m), tal limitação aponta para a necessidade de integração de sensores. Conforme Umarhadi *et al.* (2023), a incapacidade do algoritmo *Structure from Motion* em penetrar dosséis densos pode ser contornada utilizando uma aplicação complementar do LiDAR móvel — o mapeamento da topografia sob o fuste — proporcionando um MDT mais acurado. Outrossim, Gyawali *et al.* (2022) afirmaram que o inventário florestal pode ser realizado utilizando o LiDAR ou a Aerofotogrametria Digital para estimativa de altura no nível de árvores individuais, como alternativas às abordagens tradicionais de medição de campo. Por outro lado, deve ser considerado que o método terrestre também possui limitações; Schweizer *et al.* (2024) observaram que a obstrução da visão direta do topo pela vegetação dificulta a aferição via Arboreal Tree. Assim, a abordagem híbrida minimiza o viés de subestimativa causado por MDTs interpolados e, simultaneamente, oferece uma alternativa de validação para áreas onde a densidade foliar compromete a visada do ápice por sensores terrestres.

A adoção dessas ferramentas cria possibilidades que vão além da precisão técnica. Como sugerido por Pace *et al.* (2022), o uso de dispositivos intuitivos facilita a integração de dados reportados por cidadãos e gestores não especialistas, o que poderia, no futuro, criar uma rede de monitoramento de longo prazo. A tecnologia que validamos aqui para a engenharia florestal possui, portanto, uma viabilidade social e de gestão pública que merece ser explorada em escalas maiores de arborização urbana e planos de manejo.

Recomenda-se para estudos subsequentes:

- Validação em diferentes tipologias florestais (Floresta Estacional Decidua, Cerradão, Floresta Amazônica de terra firme) para verificar a robustez dos métodos em condições de estrutura de dossel distintas;
- Testagem do protocolo integrado: uso do LiDAR *smartphone* para calibração e correção do MDT gerado por VANT, aproveitando a complementaridade entre sensor ativo terrestre e sensor passivo aéreo;
- Avaliação de custo-benefício detalhada considerando diferentes escalas de inventário (<10 ha, 10-100 ha, >100 ha) e finalidades (manejo comercial, restauração, arborização urbana);
- Investigação do desempenho do LiDAR móvel em condições adversas (sub-bosque muito denso, horários de baixa luminosidade, nebulosidade) para mapear o envelope operacional completo da tecnologia;
- Comparação com LiDAR aerotransportado (ALS) para verificar se o CHM via VANT fotogramétrico atinge acurácia concordante e/ou equivalente a sensores ativos aéreos em dosséis abertos.

6 CONCLUSÃO

A avaliação comparativa das tecnologias remotas frente ao método convencional permite responder ao objetivo do estudo:

- Dentre os métodos avaliados, o sensor LiDAR embarcado em *smartphone* (aplicativo *Arboreal Tree*) foi o mais acurado na estimativa da altura total dos indivíduos arbóreos analisados, apresentando os menores erros em relação ao hipsômetro Vertex (MAE = 0,5867 m; RMSE = 0,7633 m), aproximadamente 2,4 vezes (MAE) e 2,2 vezes (RMSE) menores que os erros do CHM derivado de VANT (MAE = 1,3953 m; RMSE = 1,6981 m);
- O teste de Friedman não identificou diferença estatisticamente significativa entre os três métodos ($p = 0,105$). Esse resultado, contudo, indica apenas ausência de evidência de diferença sistemática, especialmente relevante diante do tamanho amostral reduzido ($n = 15$) e do poder estatístico limitado de testes não paramétricos nessas condições, portanto, não deve ser interpretado como medida de equivalência entre os métodos;
- As métricas de erro, por avaliarem diretamente o desvio individual em relação à referência, constituíram o critério mais adequado para hierarquizar o desempenho dos sensores;
- Com base na precisão observada nos dados deste estudo e nas evidências de eficiência reportadas na literatura, conclui-se que o LiDAR em *smartphone* foi o método mais eficiente e mais preciso para a estimativa de altura dos indivíduos arbóreos avaliados no remanescente florestal;
- O *Canopy Height Model* (CHM) gerado via VANT fotogramétrico é uma ferramenta eficaz para o monitoramento de amplas áreas, porém, apresenta limitações de acurácia em nível de indivíduo, possivelmente devido à dificuldade de penetração do sensor passivo no dossel para a modelagem do terreno (MDT);
- Embora o CHM derivado de VANT possua limitações conhecidas na inferência do terreno sob o dossel devido à oclusão passiva, o uso do LiDAR móvel mostrou-se uma alternativa terrestre viável e de rápida execução para mitigar incertezas em indivíduos onde o aerolevantamento pode apresentar subestimativas.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Arboreal, s.d. Disponível em: <<https://arboreal.se/en/arboreal-forest>> (Acesso em 09 de Maio de 2026).

BARREIRO, Susana; TOMÉ, Margarida. Manual de utilização hipsómetro Vertex III. **Publicações GIMREF-RT1/2005. Departamento de Engenharia Florestal. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa**, 2005.

BINOTI, Daniel HB et al. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 1, p. 125-129, 2013.

BRAGG, Don C. The sine method as a more accurate height predictor for hardwoods. **e-Gen. Tech. Rep. SRS-101. US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 23-33.[CD-ROM]**, 2007.

BRITO, Jorge; COELHO, Luiz. Fotogrametria digital. CEP, v. 22290, p. 270, 2007.

CAO, Lin et al. Comparison of UAV LiDAR and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 145, 2019.

CHAN, Justin et al. Testing a drop of liquid using smartphone LiDAR. **Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies**, v. 6, n. 1, p. 1-27, 2022.

COSTA, C.D.P.; ESTEVAN, D. A.; SILVA, V.M.; GORENSTEIN, M. R. Levantamento florístico e mapeamento do arboreto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Dois Vizinhos. In: I Congresso de Ciência e Tecnologia da UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2011. Anais do I Congresso de Ciência e Tecnologia da UTFPR, 2011. p. 307-311.

COSTA, Watus Cleigson Alves da. **Caracterização agronômica da cultura do café com auxílio de ferramentas do controle estatístico e sensoriamento remoto terrestre**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2019.

CRUZ, Carla Bernadete Madureira et al. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba: INPE**, v. 2011, p. 5463, 2011.

DANDOIS, Jonathan P.; ELLIS, Erle C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 259-276, 2013.

DE ALMEIDA GONÇALVES, Delman; VAN ELDIK, Tim; POKORNY, Benno. O uso de dendrômetro a laser em florestas tropicais: aplicações para o manejo florestal na amazônia. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 175-187, 2009.

DEUS, Luiz Fernando Rodrigues de. Avaliação da intensidade amostral na relação hipsométrica em plantios de seringueira. 2024.

FLORENCIO, José Vinícius de Sousa; ARAÚJO, Maria do Socorro Bezerra de; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano; QUEIROGA, Rodrigo de Miranda. Estimativa de altura de vegetação com imagens obtidas de drone utilizando técnicas de inteligência artificial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 17, n. 5, p. 3736–3749, 2024. DOI: 10.26848/rbgf.v17.5.p3736-3749. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/263641>>. Acesso em: 27 jun. 2026.

FREITAS, A. G.; WICHERT, M. C. P. Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o Criterion 400. **IPEF, Circular Técnica**, Piracicaba, n. 188, p. 1-7, 1998.

GYAWALI, Arun et al. Comparison of individual tree height estimated from LiDAR and digital aerial photogrammetry in young forests. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 3720, 2022.

HARUNA, Naziru Waget; ILIYASU, Aisha Ladidi; FINCHIWA, David Jatau. Estimation of Above-Ground Biomass and Carbon Sequestration Potential Using Arboreal Forest Mobile LiDAR Technology in an Azadirachta indica Plantation at Modibbo Adama University, Yola. **Radovi Sumarskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu**, v. 55, n. 1, 2025.

HERNÁNDEZ-MORENO, José Antonio; PÉREZ-SALICRUP, Diego Rafael; VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, Alejandro. Measuring forest inventory parameters in planted forests using LiDAR technology: Comparison of methods. **Revista mexicana de ciencias forestales**, v. 16, n. 87, p. 72-99, 2025.

IGLHAUT, Jakob et al. Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 155-168, 2019.

INPE. LIDAR. Sensores e Plataformas, 2018. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/lidar>>. Acesso em: 13/05/2026.

KITAHARA, Fumiaki; MIZOUE, Nobuya; YOSHIDA, Shigejiro. Evaluation of data quality in Japanese national forest inventory. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 159, n. 1, p. 331-340, 2009.

KRAUS, Karl; PFEIFER, Norbert. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing**, v. 53, n. 4, p. 193-203, 1998.

LAMEIRA, MK da S. Análise da estrutura horizontal e composição de uma floresta tropical como subsídio à ampliação do seu potencial produtivo para o manejo florestal. 2023.

LARJAVAARA, Markku; MULLER-LANDAU, Helene C. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 4, n. 9, p. 793-801, 2013.

LINDBERG, Lisa. Insamling av skogliga data med applikationen Arboreal Skog. 2020.

LUETZENBURG, Gregor; KROON, Aart; BJØRK, Anders A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an application in geosciences. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 22221, 2021.

LUOMA, Ville et al. Assessing precision in conventional field measurements of individual tree attributes. **Forests**, v. 8, n. 2, p. 38, 2017.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Curitiba: UFPR, 2003. 309 p.

MEDINA, Alex Soria; MEDINA, Simone da Silva Soria. A representação da superfície topográfica através de modelos digitais de terreno. **GRAPHICA 2007**, p. 1-8, 2007.

NATURAL RESOURCES CANADA. Electromagnetic Radiation, 2017. Disponível em: <<https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-elevation-data-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/introduction/electromagnetic-radiation/14621>>. Acesso em: 08/05/2024.

PACE, Rocco et al. Tree measurements in the urban environment: Insights from traditional and digital field instruments to smartphone applications. **Arboriculture & Urban Forestry (AUF)**, v. 48, n. 2, p. 113-123, 2022.

PARKER, R. C. et al. Mississippi's forest inventory pilot program: Use of computer and spatial technologies in large area inventories. Forest and Wildlife Research Center. **Bulletin FO**, v. 274, 2005.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Curitiba-PR: UFPR, 1997. 316p.

PERTILLE, Carla Talita et al. Effects of flight and smoothing parameters of number of trees with aerial imagery in a native Brazilian atlantic forest remnant. **CERNE**, v. 30, p. e-103338, 2024.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. Sensoriamento **remoto da vegetação**. Oficina de textos, 2015.

PRICE, Margaret A.; ATTENBOROUGH, Keith; HEAP, Nicholas W. Sound attenuation through trees: Measurements and models. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 84, n. 5, p. 1836-1844, 1988.

ROSA, Roberto. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Uberlândia: EDUFU, 1990. SAE-NGOW, Pornperm et al. Smartphone LiDAR for urban forest carbon assessment: A comparative study with traditional methods. **MethodsX**, v. 15, p. 103473, 2025.

SANDIM, André et al. New technologies for expedited forest inventory using smartphone applications. **Forests**, v. 14, n. 8, p. 1553, 2023.

SANZ-ABLANEDO, Enoc et al. Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1606, 2018.

SCHWEIZER, Daniella et al. Review and assessment of smartphone apps for forest restoration monitoring. **Restoration Ecology**, v. 32, n. 4, p. e14136, 2024.

SIEGEL, Sidney; CASTELLAN JR, N. John. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. Artmed Editora, 2006.

SILVA, Emanuel Araújo et al. Uso de Aeronave Remotamente Pilotada para Extração de Variáveis Dendrométricas de uma Floresta Tropical Seca. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 2054–2068, 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.3.p2054-2068. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/263188>>. Acesso em: 27 jun. 2026.

SILVA, Gilson Fernandes da et al. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, v. 36, p. 341-348, 2012.

SLADE, Glenn et al. Repeated drone photogrammetry surveys demonstrate that reconstructed canopy heights are sensitive to wind speed but relatively insensitive to illumination conditions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 24-41, 2025.

SOARES, Paula et al. A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados no inventário florestal—o caso do montado de sobro. In: **Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia-CNCG**. 2015. p. 1-8.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia et al. Fotogrametria: aplicações a curta distância. In: **FCT**. 1999. p. 147-59.

TORRES, Fernanda Magri; TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. A lightweight uav-based laser scanning system for forest application. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 24, n. 3, p. 318-334, 2018.

UMARHADI, Deha Agus et al. Can iPhone/iPad LiDAR data improve canopy height model derived from UAV?. In: **BIO Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023. p. 03003

VASILESCU, Maria Magdalena. Standard Error of Tree Height Using “Vertex III”. **Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry• Wood Industry• Agricultural Food Engineering**, p. 75-80, 2013.

VILLASANTE, Antonio; FERNANDEZ, Cristina. Measurement errors in the use of smartphones as low-cost forestry hypsometers. **Silva Fennica**, v. 48, n. 5, 2014.

WALLACE, Luke et al. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. **Forests**, v. 7, n. 3, p. 62, 2016.

WEISS, Marie; JACOB, Frédéric; DUVEILLER, Grgory. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. **Remote sensing of environment**, v. 236, p. 111402, 2020.

WERTZ, Bogdan et al. Effect of the interaction between user experience and hypsometer type on the uncertainty of ground-based tree height measurement. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 99, n. 1, p. cpaf022, 2026.

WHITE, Joanne C. et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 5, p. 619-641, 2016.

WU, Haozun. **Technologies for silviculture activities: understanding of the practicality of GIS and remote sensing, smartphone, and UAV Lidar**. 2020. Tese de Doutorado.

YADAV, Yogender et al. Integration of iphone lidar with quadcopter and fixed wing uav photogrammetry for the forestry applications. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 48, p. 213-218, 2023.

ZHANG, Keqi et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 41, n. 4, p. 872-882, 2003.