

ACURÁCIA DA ESTIMATIVA DA ALTURA DE ÁRVORES URBANAS UTILIZANDO IMAGENS OBTIDAS POR DRONE E PROCESSADAS PELO SOFTWARE PIX4DMAPPER

ACCURACY OF ESTIMATING THE HEIGHT OF URBAN TREES USING IMAGES
OBTAINED BY DRONE AND PROCESSED BY PIX4DMAPPER SOFTWARE

Engenharias • 11/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/791605015](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/791605015)

Wellington Jorge Cavalcanti Lundgren

RESUMO

As alturas de treze árvores urbanas foram determinadas por dois métodos: o hipsômetro Vertex IV e o software Pix4Dmapper. As medições obtidas pelo Vertex IV foram consideradas como valores de referência para a avaliação da acurácia das estimativas fornecidas pelo software. Foram analisados o erro médio (EM), a variância dos erros (S^2), o desvio padrão dos erros (S), o erro percentual absoluto individual ($E\%_i$) e o erro percentual médio ($E\%_m$). Além disso, foi construído um gráfico de dispersão entre as alturas obtidas pelos dois métodos, sendo avaliados, por meio de regressão linear simples, o coeficiente angular da reta (a), o intercepto (b) e o coeficiente de determinação (R^2). O erro percentual médio foi de aproximadamente 38%, enquanto o desvio padrão dos erros foram de 1,53 e 1,24 m, respectivamente. As alturas médias obtidas pelo Vertex IV e pelo Pix4Dmapper foram de 3,36 m e 2,52 m. A regressão linear apresentou coeficiente angular igual a 0,51, e intercepto próximo de 2,0 m. O coeficiente de determinação obtido foi baixo, evidenciando reduzida capacidade preditiva do modelo. Os resultados indicam que o Pix4Dmapper não forneceu estimativas suficientemente precisas para a determinação da altura das árvores.

Palavras-chave: Palavras-chave.

ABSTRACT

The heights of thirteen urban trees were determined using two methods: the Vertex IV hypsometer and the Pix4Dmapper software. The measurements obtained by the Vertex IV were considered as reference values for evaluating the accuracy of the estimates provided by the software. The mean error (ME), the variance of the errors (S^2), the standard deviation of the errors (S), the individual absolute percentage error ($E\%_i$), and the mean percentage error ($E\%_m$) were analyzed. In addition, a scatter plot was constructed

between the heights obtained by the two methods, and the slope (a), intercept (b), and coefficient of determination (R^2) were evaluated using simple linear regression. The mean percentage error was approximately 38%, while the standard deviations of the errors were 1.53 m and 1.24 m, respectively. The average heights obtained by the Vertex IV and Pix4Dmapper were 3.36 m and 2.52 m. The linear regression presented an angular coefficient equal to 0.51, and an intercept close to 2.0 m. The coefficient of determination obtained was low, evidencing reduced predictive capacity of the model. The results indicate that Pix4Dmapper did not provide sufficiently precise estimates for determining tree height.

Keywords: Drone; Urban afforestation; Photogrammetry; Tree height; Tree inventory.

1. INTRODUÇÃO

A arborização urbana desempenha papel fundamental na melhoria da qualidade ambiental das cidades, proporcionando benefícios relacionados à regulação microclimática, redução da poluição atmosférica, interceptação da radiação solar, aumento da biodiversidade e promoção do bem-estar físico e psicológico da população (Yin et al., 2024). Em virtude desses benefícios, o planejamento e a gestão da floresta urbana têm recebido crescente atenção por parte de pesquisadores e gestores públicos, principalmente em regiões submetidas a elevadas temperaturas e intensa urbanização.

Apesar das vantagens proporcionadas pelas árvores, a convivência entre a vegetação e a infraestrutura urbana pode resultar em diversos conflitos. Problemas como danos às calçadas e tubulações subterrâneas, interferências na sinalização viária e contato dos

galhos com as redes elétricas são frequentemente relatados em cidades brasileiras e de outras regiões do mundo (Cunha et al., 2020). Dessa forma, o conhecimento das características dendrométricas dos indivíduos arbóreos constitui uma ferramenta importante para subsidiar ações de manejo, minimizar conflitos e aumentar a eficiência do planejamento urbano.

A obtenção dessas informações, entretanto, demanda grande quantidade de mão de obra, tempo e recursos financeiros, especialmente em levantamentos realizados em larga escala. Nesse contexto, o emprego de veículos aéreos não tripulados (VANTs), associado ao avanço dos softwares de fotogrametria digital, tem ampliado significativamente as possibilidades de aquisição de informações dendrométricas com elevada resolução espacial e menor custo operacional (Feng; Liu; Gong, 2022). O uso de imagens obtidas por drones e posteriormente processadas por algoritmos de reconstrução tridimensional representa uma alternativa promissora para a realização de inventários florestais e censos arbóreos em ambientes urbanos.

Entre os atributos dendrométricos de maior relevância destaca-se a altura das árvores, uma vez que essa variável está diretamente relacionada ao potencial de interferência com redes elétricas, placas de sinalização e outras estruturas urbanas. Além disso, a altura constitui uma variável fundamental em estudos de crescimento, biomassa e modelagem de serviços ecossistêmicos (Dalla Corte et al., 2020). Entretanto, a determinação da altura de árvores em pé continua sendo uma operação sujeita a erros de medição, mesmo quando realizada por observadores experientes utilizando equipamentos especializados. Diferenças entre operadores, limitações instrumentais e características da arquitetura das copas

podem influenciar significativamente a precisão das estimativas (Hao et al., 2022).

Nos últimos anos, diversos estudos têm investigado a utilização de imagens aéreas e modelos tridimensionais para estimar a altura de árvores urbanas. Birdal et al. (2017) avaliaram árvores urbanas em Eskisehir, Turquia utilizando o software Pix4Dmapper para geração de modelos digitais de superfície e modelos digitais do terreno, verificando que a precisão das estimativas tende a aumentar em árvores de maior porte.

Mais recentemente, Feng, Liu e Gong (2022) destacaram que os avanços na fotogrametria digital e no sensoriamento remoto por VANTs têm permitido a obtenção de informações dendrométricas com níveis de precisão cada vez mais elevados, embora a acurácia das estimativas ainda possa ser influenciada pelo porte dos indivíduos, pela arquitetura das copas e pela resolução espacial das imagens.

Apesar de existirem diversos estudos envolvendo árvores de médio e grande porte, ainda são escassas as investigações relacionadas à precisão das estimativas obtidas por fotogrametria em árvores urbanas de pequeno porte submetidas a podas, situação comum em muitas cidades brasileiras. Dessa forma, torna-se relevante avaliar a confiabilidade dessas tecnologias em condições reais de manejo urbano.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia das estimativas de altura de árvores urbanas obtidas por meio de imagens aéreas adquiridas por drone e processadas pelo software Pix4Dmapper, utilizando como referência as medições

realizadas em campo com o hipsômetro Haglôf Vertex IV. Adicionalmente, buscou-se quantificar os erros associados às estimativas e verificar se as imagens ortorretificadas produzidas pelo software apresentam precisão suficiente para aplicação em inventários arbóreos urbanos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

O estudo foi conduzido na Rua João de Souza Melo, localizada no bairro AAB, no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil ($07^{\circ}59'31''$ S e $38^{\circ}17'54''$ W), a cidade tem uma altitude aproximada de 429 m. Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população do município era de 86.915 habitantes em 2020. A rua estudada apresenta arborização composta por indivíduos submetidos a podas, característica comum em diversas cidades do semiárido brasileiro.

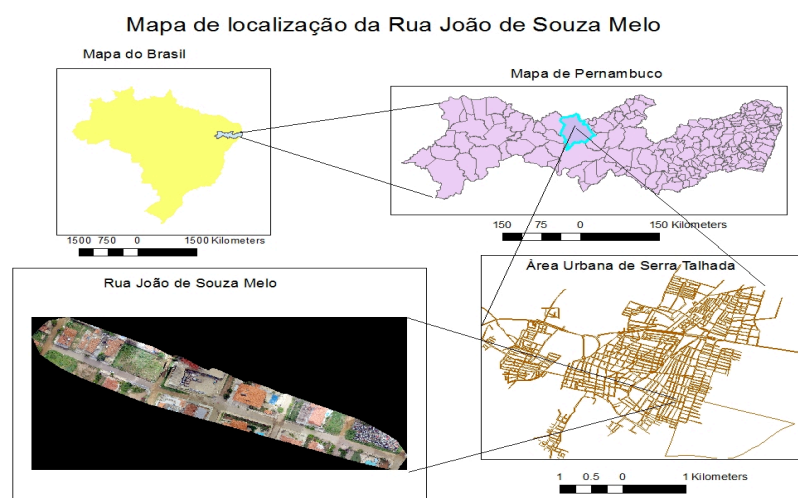


Figura 1. Localização da Rua João de Souza Melo, Serra Talhada – PE.

2.2. Aquisição e Processamento das Imagens

As imagens aéreas foram obtidas por meio de um veículo aéreo não tripulado (VANT) DJI Phantom 3 Advanced, sem a utilização de pontos de controle em solo. O plano de voo foi elaborado e executado automaticamente utilizando o aplicativo Pix4Dcapture. A aquisição das imagens ocorreu entre 11h30min e 12h00min, horário escolhido para minimizar a influência das sombras projetadas pelas árvores e pelas edificações sobre a qualidade das imagens.

As fotografias foram capturadas a uma altitude de 35 m e posteriormente processadas no software Pix4Dmapper®, responsável pela geração do ortomosaico georreferenciado e ortorretificado em formato GeoTIFF. Além do ortomosaico, o software possibilitou a visualização tridimensional da área estudada por meio da reconstrução fotogramétrica.

2.3. Determinação da Altura das Árvores Pelo Pix4Dmapper

O Pix4Dmapper não fornece diretamente a altura das árvores, sendo esta obtida a partir da diferença entre as elevações fornecidas pelo Modelo Digital de Superfície (MDS) e pelo Modelo Digital do Terreno (MDT). Assim, a altura da árvore foi estimada pela diferença entre a altitude correspondente ao topo da copa e a altitude do solo adjacente ao indivíduo. Para cada árvore, inicialmente posicionou-se o cursor sobre a região correspondente ao topo da copa na imagem tridimensional, sendo registrada a altitude fornecida pelo software. Em seguida, o cursor foi posicionado em um ponto do terreno próximo à árvore, permitindo a obtenção da altitude do solo. A diferença entre essas duas elevações foi considerada a estimativa da altura da árvore.

Krause et al. (2019), avaliaram a precisão da estimativa da altura de *Pinus sp* em um plantio em Brandenburg na Alemanha, utilizando imagens obtidas por drone. Eles informam que obtiveram excelentes resultados, contudo, vale salientar que as árvores medidas por eles possuíam mais de trinta anos de idade, portanto eram bem altas.

2.4. Medição das Alturas em Campo

As alturas das árvores em campo foram determinadas utilizando-se o hipsômetro Haglöff Vertex IV®, equipamento amplamente empregado em estudos florestais em razão de sua elevada precisão e confiabilidade (Ganz; Käber; Adler, 2019). Neste estudo, as medições obtidas pelo Vertex IV foram consideradas como valores de referência para a avaliação da acurácia das estimativas produzidas pelo Pix4Dmapper.

Foram selecionadas treze árvores distribuídas ao longo da Rua João de Souza Melo. Cada indivíduo teve sua altura determinada pelos dois métodos, permitindo a comparação entre os valores obtidos em campo e aqueles estimados por fotogrametria.

2.5. Avaliação da Acurácia das Estimativas

Foi construído um gráfico de dispersão entre as alturas obtidas pelos dois métodos. Ajustou-se uma regressão linear simples, sendo avaliados o coeficiente angular da reta (a), o intercepto (b) e o coeficiente de determinação (R^2). Em avaliações de acurácia, valores do coeficiente angular próximos da unidade, interceptos próximos de zero e elevados valores de R^2 indicam maior concordância entre os métodos (Ganz; Käber; Adler, 2019).

Em seguida, foram calculadas estatísticas associadas aos erros de estimativa, incluindo erro médio (EM), variância dos erros (S^2) e desvio padrão dos erros (S). Também foram determinados o erro percentual individual e o erro percentual médio. Valores próximos de zero indicam maior precisão das estimativas.

As expressões utilizadas foram:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (01)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (02)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n e_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n e_i \right)^2}{n} \right] \quad (03)$$

$$e_i = H_{V_i} - H_{P_i} \quad (04)$$

O erro percentual individual foi calculado por:

$$E(\%)_i = \frac{e_i}{H_{V_i}} \quad (05)$$

e o erro percentual médio por:

$$E(\%)_m = \frac{\sum_{i=1}^n E(\%)_i}{n} \quad (06)$$

em que:

EM = erro médio;

e_i = erro associado à árvore ;

$E(\%)_i$ = erro percentual da árvore i ;

$E(\%)_m$ = erro percentual médio;

S = desvio padrão dos erros;

s^2 = variância dos erros;

n = número de árvores avaliadas ($n = 13$);

H_{V_i} = altura da árvore i medida pelo Vertex IV;

H_{P_i} = altura da árvore i estimada pelo Pix4Dmapper.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento das 67 imagens obtidas pelo drone DJI Phantom 3 Advanced permitiu a geração do ortomosaico da rua João de Souza Melo e a reconstrução tridimensional das copas das treze árvores selecionadas para o estudo. Embora o método baseado na diferença entre MDS e MDT seja conceitualmente simples, sua aplicação em árvores urbanas de pequeno porte apresenta limitações. As árvores avaliadas neste estudo possuíam alturas inferiores à rede elétrica e haviam sido submetidas a podas do tipo topiaria, resultando em copas pequenas e relativamente planificadas. Essa característica reduz a diferença de altitude entre os pontos mais elevados da copa e o terreno, tornando as estimativas sensíveis a pequenas imprecisões na determinação das altitudes. Segundo Dalla Corte et al. (2020), a precisão das estimativas obtidas por fotogrametria depende fortemente da resolução espacial das imagens e das características estruturais da vegetação avaliada.

A resolução espacial das imagens mostrou-se suficiente para a individualização das árvores e para a determinação dos pontos correspondentes ao topo das copas. A imagem da rua João de Souza Melo está apresentada na Figura 2.



Figura 2. Imagem aérea da rua João de Souza Melo.

As medições realizadas com o hipsômetro Vertex IV apresentaram maior objetividade, uma vez que o equipamento fornece diretamente a altura do indivíduo, reduzindo a influência da experiência do operador sobre o resultado obtido. De acordo com Ganz, Käber e Adler (2019), medições de altura realizadas em campo continuam sendo a principal referência para a avaliação da acurácia de métodos indiretos baseados em sensoriamento remoto.

Além disso, a própria natureza da variável altura contribui para a ocorrência de discrepâncias entre diferentes métodos de medição. A determinação da altura de árvores em pé é reconhecidamente uma operação sujeita a erros, mesmo quando realizada em campo com instrumentos especializados. Hao et al. (2022) observaram que diferentes métodos podem fornecer resultados distintos para uma mesma árvore, evidenciando a dificuldade inerente à obtenção dessa variável dendrométrica. Larjavaara e Muller-Landau (2013) destacam que erros relativamente pequenos na identificação visual do ápice da copa podem resultar em diferenças consideráveis nas estimativas finais, especialmente em indivíduos de reduzida altura.

Observando a Figura 3, o leitor notará que as duas árvores marcadas, a árvore 1 e a 2, possuem a copa planificada no topo, características rotineiras das árvores das calçadas da cidade de Serra Talhada e que estão as duas uma ao lado da outra. No caso as duas árvores deveriam fornecer exatamente a mesma altura, ou no máximo uma diferença desprezível, nota-se que o Vertex IV forneceu a mesma altura, porém o Pix4Dmapper apresentou uma diferença entre ela de 26 cm ver Tabela – 01, uma diferença de aproximadamente 7% em relação a árvore 1.



Figura 3. Árvores 1 e 2 em foto 3D.

A baixa densidade arbórea observada na Rua João de Souza Melo também facilitou a escolha das árvores avaliadas. Os treze indivíduos distribuídos ao longo dos 415,53 m da via apresentavam grande exposição lateral, reduzindo problemas de sobreposição de copas e favorecendo a reconstrução tridimensional das árvores. Em condições de maior densidade, a delimitação individual das copas poderia se tornar ainda mais complexa, aumentando as dificuldades para a determinação da altura por métodos fotogramétricos (Kwong e Fung, 2020).

De maneira geral, os resultados indicam que as características estruturais das árvores avaliadas exerceram influência significativa sobre o desempenho do método baseado em imagens aéreas. O

pequeno porte dos indivíduos, as copas submetidas a podas e a necessidade de seleção manual dos pontos de medição introduziram fontes adicionais de incerteza que não estão presentes nas medições realizadas diretamente em campo com o Vertex IV. Esses resultados reforçam que a precisão das estimativas de altura obtidas por fotogrametria não depende apenas da qualidade das imagens e do software utilizado, mas também das características dendrométricas dos indivíduos avaliados e do procedimento empregado para a obtenção das medidas. A Tabela 1 apresenta os resultados das alturas das árvores efetuadas pelo Pix4Dmapper e pelo Vertex IV.

As alturas das treze árvores avaliadas apresentaram diferenças consideráveis entre as medições realizadas em campo com o hipsômetro Vertex IV e as estimativas obtidas pelo software Pix4Dmapper.

Tabela 1. Altura das árvores da rua João de Souza Melo.

Nº das árvores	1	2	3	4	5
Vertex IV (m)	5,50	5,50	3,20	3,20	3,20
Pix4Dmapper (m)	3,52	3,78	0,54	2,42	4,20
e_i	1,98	1,72	2,66	0,78	-1,00

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/acuracia->

Em geral, observou-se predominância de erros positivos, indicando tendência de subestimação da altura pelo método fotogramétrico. Das treze árvores analisadas, dez apresentaram valores de altura inferiores aos medidos pelo Vertex IV, enquanto apenas três indivíduos tiveram suas alturas superestimadas pelo Pix4Dmapper. Esse comportamento sugere a existência de um viés sistemático nas estimativas produzidas pelo software, provavelmente associado às dificuldades de identificação precisa do ápice das copas e da superfície do terreno.

Os maiores erros absolutos foram observados nas árvores 3 e 11, cujas diferenças entre os métodos atingiram 2,66 m e 2,19 m, respectivamente. Em contrapartida, a árvore 6 apresentou elevada concordância entre os métodos, com diferença de apenas 0,05 m. Essa variabilidade entre os erros individuais evidencia que a precisão das estimativas obtidas por fotogrametria não é uniforme, sendo influenciada por características específicas de cada indivíduo, como arquitetura da copa, forma geométrica, tamanho e posição em relação aos objetos vizinhos.

Os erros percentuais individuais variaram de -64% a 83%, correspondendo a diferenças relativas superiores a 80% em determinados indivíduos. Os maiores erros percentuais ocorreram nas árvores de menor porte, especialmente nos indivíduos 3, 10 e 12.

As características das árvores avaliadas também contribuíram para a magnitude dos erros observados. Todos os indivíduos apresentavam reduzido porte e haviam sido submetidos a podas do tipo topiaria. Essa condição dificulta a identificação exata do ponto mais elevado

da árvore e reduz a diferença altimétrica entre o topo da copa e a superfície do terreno. Além disso, em árvores com alturas inferiores a 5 m, erros de poucos centímetros nas altitudes obtidas pelo MDS e pelo MDT podem resultar em diferenças percentuais expressivas nas estimativas finais. A Tabela 2 apresenta as estatísticas básicas obtidas pelos dois métodos.

Tabela 2. Estatísticas das medidas obtidas pelo Vertex IV e o Pix4Dmapper.

Estatísticas	Métodos	
	Vertex IV	Pix4Dmapper
Média	3,36	2,52
Mediana	3,20	2,54
Variância	1,83	2,21
Desvio padrão	1,35	1,49
Máximo	5,50	4,60
Mínimo	1,43	0,54

As estatísticas descritivas das alturas obtidas pelos métodos Vertex IV e Pix4Dmapper (Tabela 2) evidenciam diferenças importantes entre os dois procedimentos de medição. A altura média observada pelo Vertex IV foi de 3,36 m, enquanto o Pix4Dmapper apresentou média de 2,52 m, indicando uma subestimativa média de aproximadamente 0,84 m. A mesma tendência foi observada para a mediana, cujos valores foram de 3,20 m e 2,54 m, respectivamente. A proximidade entre média e mediana em ambos os métodos sugere distribuições relativamente simétricas, sem forte influência de valores extremos. Entretanto, a diferença entre as estatísticas

centrais evidencia que o método fotogramétrico apresentou tendência sistemática em fornecer valores inferiores aos observados em campo.

A análise da dispersão dos dados revelou comportamento semelhante entre os dois métodos. A variância das alturas obtidas pelo Vertex IV foi de 1,83 m², enquanto o Pix4Dmapper apresentou valor ligeiramente superior, 2,21 m². Consequentemente, os desvios-padrão foram de 1,35 m e 1,49 m, respectivamente. Esses resultados indicam que, além da tendência à subestimação, as alturas estimadas pelo software apresentaram maior variabilidade em relação às medidas de referência.

Os valores máximos e mínimos obtidos reforçam essa interpretação. A maior altura observada pelo Vertex IV foi de 5,50 m, enquanto o Pix4Dmapper estimou valor máximo de 4,60 m. Da mesma forma, a menor altura medida em campo foi de 1,43 m, ao passo que o software estimou apenas 0,54 m. Esses resultados evidenciam que a subestimação ocorreu tanto em árvores de maior porte quanto nos indivíduos menores.

De maneira geral, as estatísticas descritivas indicam que o Pix4Dmapper reproduziu satisfatoriamente a amplitude das alturas observadas em campo, porém apresentou tendência de subestimar os valores e maior dispersão das estimativas em comparação com o Vertex IV. Esses resultados demonstram que, embora a fotogrametria baseada em veículos aéreos não tripulados constitua uma ferramenta promissora para levantamentos florestais urbanos, sua aplicação em árvores de pequeno porte e submetidas a podas deve ser acompanhada de medições de campo, especialmente quando elevada precisão é requerida.

Um gráfico de dispersão relacionando as medidas de altura realizadas com o Vertex IV e o Pix4Dmapper foi construído e pode ser visualizado na Figura 4.

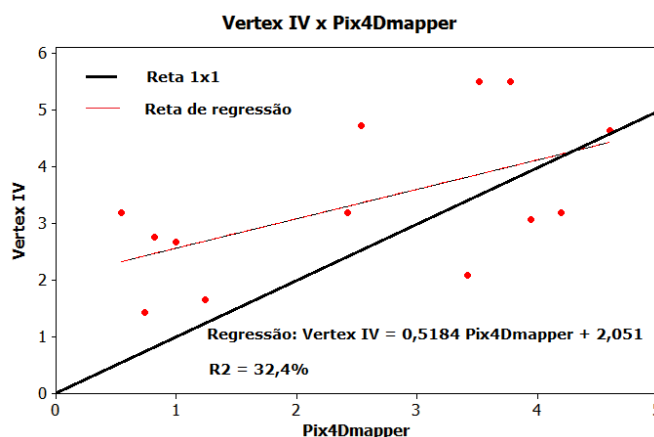


Figura 4. Gráfico de dispersão, com reta de regressão.

A relação entre as alturas medidas pelo Vertex IV e aquelas estimadas pelo Pix4Dmapper é apresentada na Figura 4. O gráfico de dispersão evidencia uma elevada dispersão dos pontos em torno da reta de identidade (1:1), indicando baixa concordância entre os dois métodos de medição. Em condições ideais, todos os pontos deveriam estar próximos da reta 1:1, o que representaria igualdade entre as alturas observadas em campo e aquelas estimadas pelo software. Entretanto, observa-se que diversos pontos se encontram afastados dessa condição, revelando diferenças consideráveis entre os métodos. A equação ajustada pela regressão linear simples foi:

$$Vertex\ IV = 0,5184\ Pix4Dmapper + 2,051$$

sendo obtido coeficiente de determinação igual a $R^2 = 0,324$. O baixo valor de R^2 indica que apenas cerca de um terço da variação observada nas alturas medidas em campo é explicada pelas estimativas geradas pelo Pix4Dmapper, evidenciando reduzida capacidade preditiva do modelo. Segundo Puliti et al. (2020), elevados valores do coeficiente de determinação são desejáveis em

avaliações de atributos dendrométricos obtidos por sensoriamento remoto, sendo indicadores da consistência entre os valores observados e os estimados.

Outro aspecto importante refere-se ao coeficiente angular da reta de regressão $a = 0,5184$, significativamente inferior ao valor ideal de 1,0. Esse resultado evidencia que as variações nas alturas fornecidas pelo Pix4Dmapper não foram acompanhadas proporcionalmente pelas alturas medidas em campo. Em outras palavras, aumentos na altura estimada pelo software não corresponderam a incrementos equivalentes nas alturas determinadas pelo Vertex IV. Além disso, o intercepto da reta $b = 2,051$ m apresenta valor relativamente elevado em relação às alturas médias observadas, indicando a presença de um viés sistemático entre os métodos. De acordo com Goodbody et al. (2019), em estudos de validação de variáveis dendrométricas obtidas por fotogrametria, coeficientes angulares próximos da unidade e interceptos próximos de zero representam condições desejáveis de concordância entre métodos.

A distribuição dos pontos sugere ainda a existência de heterogeneidade na magnitude dos erros. Árvores com valores semelhantes de altura estimada pelo Pix4Dmapper apresentaram diferenças consideráveis nas alturas medidas em campo, evidenciando elevada dispersão residual.

Embora seja possível identificar uma tendência linear positiva entre as variáveis, o afastamento em relação à reta 1:1 evidencia que as estimativas produzidas pelo Pix4Dmapper apresentaram baixa exatidão. Em ambientes urbanos, essas limitações tendem a ser ainda mais pronunciadas em razão das podas e da proximidade de edificações e outros elementos da infraestrutura urbana.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que o Pix4Dmapper foi capaz de reproduzir parcialmente a tendência geral das alturas das árvores, porém apresentou desempenho insuficiente para substituir as medições realizadas em campo com o Vertex IV. A baixa aderência dos pontos à reta de identidade e o reduzido coeficiente de determinação sugerem que as estimativas obtidas por fotogrametria devem ser utilizadas com cautela em árvores urbanas de pequeno porte, sendo recomendável sua calibração por meio de medições de campo ou sua aplicação em conjunto com outras técnicas de sensoriamento remoto.

4. CONCLUSÕES

As estimativas de altura obtidas pelo Pix4Dmapper apresentaram baixa concordância com as medições realizadas em campo pelo hipsômetro Vertex IV, evidenciando tendência de subestimação das alturas e reduzida capacidade preditiva do modelo de regressão. Dessa forma, nas condições avaliadas, o software não apresentou precisão suficiente para substituir as medições de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIRDAL, A. C., AVDAN, U., & TÜRK, T. (2017). Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 8(2), 1144–1156. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1300608>.

CUNHA, Vagner Luiz Cardoso de Medeiros; MAGALHÃES, Luís Mauro Sampaio; FREITAS, Welington Kiffer de; MENDONÇA, Bruno Araujo Furtado de. Conflitos da Arborização com Elementos Urbanos na Cidade de Valença, Estado do Rio de Janeiro. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 28–41, 2020. DOI:

<https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/69850>. Acesso em: 25 jun. 2026.

DALLA CORTE, A. P.; REX, F. E.; SANQUETTA, C. R.; et al. Forest inventory with high-density UAV-LiDAR: machine learning approaches for predicting individual tree attributes. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 9, p. 1452, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169920308838>. Acesso em: 25 jun. 2026.

FENG, Q.; LIU, J.; GONG, J. UAV remote sensing for urban vegetation mapping and monitoring: a review. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 3, 2022. https://www.researchgate.net/publication/271519732_UAV_Remote_Sensing_for_Urban_Vegetation_Mapping_Using_Random_Forest_and_Texture_Analysis#fullTextFileContent. Acesso em: 25 jun. 2026.

GANZ, S.; KÄBER, Y.; ADLER, P. Measuring tree height with remote sensing: a comparison of photogrammetric and LiDAR data with different field measurements. **Forests**, Basel, v. 10, n. 8, p. 694, 2019. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/8/694>. Acesso em: 25 jun. 2026.

GOODBODY, T. R. H.; COOPS, N. C.; WHITE, J. C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions. **Current Forestry Reports**, Cham, v. 5, p. 55-75, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40725-019-00087-2>. Acesso em: 25 jun. 2026.

HAO, J. et al. Tree Canopy Height Estimation and Accuracy Analysis Based on Uav Remote Sensing Images. The International Archives of

the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 43, p. 129-134, 2022. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B2-2022/129/2022/isprs-archives-XLIII-B2-2022-129-2022.html>. Acesso em: 25 jun. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da população residente para os municípios brasileiros em 2020. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2020. <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 jun. 2026.

KRAUSE, S.; SANDERS, T. G. M.; MUNNÉ-BOSCH, S. et al. UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 7, art. 758, 2019. DOI: 10.3390/rs11070758. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/7/758>. Acesso em: 25 jun. 2026.

KWONG, I. H. Y., & FUNG, T. (2020). Tree height mapping and crown delineation using LiDAR, large format aerial photographs, and unmanned aerial vehicle photogrammetry in subtropical urban forest. **International Journal of Remote Sensing**, 41(14), 5228–5256. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1731002>. Acesso em: 25 jun. 2026.

LARJAVAARA, M.; MULLER-LANDAU, H. C. Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. **Methods in Ecology and Evolution**, London, v. 4, n. 9, p. 793-801, 2013. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/2041-210X.12071>. Acesso em: 25 jun. 2026.

PULITI, Stefano; BREIDENBACH, Johannes; ASTRUP, Rasmus. Estimation of forest growing stock volume with UAV laser scanning data: can it be done without field data?. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8,

p. 1245, 2020. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1245>. Acesso em: 25 jun. 2026.

YIN, Y.; LI, S.; XING, X.; et al. Cooling benefits of urban tree canopy: a systematic review. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 12, p. 4955, 2024. https://www.researchgate.net/publication/381348945_Cooling_Benefits_of_Urban_Tree_Canopy_A_Systematic_Review#fullTextFileContent.