



# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## USO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS PARA DERIVAÇÃO DE ALTURAS DE EDIFICAÇÕES DO ENTORNO DE UMA FONTE FIXA DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

\* Patrícia Fontes Ferraz <sup>1</sup>  
Paulo Costa de Oliveira Filho <sup>1</sup>

## USE OF REMOTELY-PILOTED AIRCRAFT TO DERIVE BUILDING HEIGHTS FROM THE SURROUNDINGS OF A FIXED SOURCE OF ATMOSPHERIC POLLUTION

Recibido el 25 de agosto de 2021. Aceptado el 8 de diciembre de 2021

### Abstract

*Air pollution is a topic of relevant interest as it directly affects the health and well-being of the population. One of the main sources of air pollution emission is stationary or fixed, such as industrial ducts and chimneys, which must be properly sized, considering factors such as the heights of buildings neighboring point sources, so that the emission of pollutants reaches the receptors (neighboring population) in a sufficiently diluted way so as not to cause any harmful effects. In this sense, remote sensing is an alternative for managing air quality control, with RPAs standing out as a practical and low-cost tool for obtaining the dimensions of imaged objects. This research aimed to evaluate the heights of buildings located in the area of influence of an industry, derived from MDS and MDT, obtained through high-resolution images from aerial survey with RPA. To validate the heights obtained from the models, 70 buildings were sampled in the field. The statistical analysis of the data obtained in the field and those from the models showed the following errors in the estimate: RMSE = 20 cm and R-RMSE = 4.93% and R2 of 0.99. The use of RPAs proved to be viable to determine the height of buildings inserted in the area of influence of atmospheric emission sources.*

**Keywords:** remote sensing, geographic information system, DSM, DTM.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil.

\*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste, Rua Profª Rosa Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez, Irati/PR, CEP: 84.505-677, Brasil. E-mail: [patriciafontesferraz@yahoo.com.br](mailto:patriciafontesferraz@yahoo.com.br)

## Resumo

A poluição atmosférica é um tema de relevante interesse à medida que afeta diretamente a saúde e o bem-estar da população. Uma das principais fontes de emissão de poluição atmosférica são as estacionárias ou fixas, como, por exemplo, dutos e chaminés de indústrias. Estes devem ser adequadamente dimensionados, considerando fatores como as alturas das edificações vizinhas às fontes pontuais, de forma que a emissão dos poluentes atinja os receptores (população vizinha) de maneira suficientemente diluída para não lhes causar nenhum efeito nocivo. Nesse sentido, o sensoriamento remoto é uma alternativa para a gestão do controle da qualidade do ar, com os ARPs (aeronaves remotamente pilotadas) se destacando como uma ferramenta prática e de baixo custo para obtenção das dimensões dos objetos imageados. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar as alturas das edificações situadas na área de influência de uma indústria, derivadas a partir de MDS e MDT, obtidos através de imagens de alta resolução, provenientes de levantamento aéreo com ARP. Para validação das alturas obtidas dos modelos, amostrou-se em campo 70.00 edificações. A análise estatística dos dados obtidos em campo e dos provenientes dos modelos demonstrou os seguintes erros na estimativa: RMSE = 20.00 cm, R-RMSE = 4.93% e R2 de 0.99. O uso de ARPs mostrou-se, portanto, viável para determinação da altura das edificações inseridas na área de influência de fontes de emissão atmosférica.

**Palavras chave:** sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas, MDS, MDT.

## Introdução

A contaminação atmosférica é um tema de relevante interesse à medida que afeta diretamente a saúde e o bem-estar da população. A cada ano, estima-se que a exposição à poluição do ar cause sete milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vida saudáveis (WHO, 2021). As fontes de emissão podem ser tanto fixas, como as indústrias, quanto móveis, como os veículos automotores. A presença dessas fontes e suas características, os níveis de concentração dos poluentes, a topografia da região e as particularidades da vizinhança são parâmetros que, associados, indicam a forma de dispersão da nuvem de poluentes e o estado de contaminação do ar (Engel-Cox, *et al.*, 2013).

As fontes fixas são conceitualmente classificadas como pontuais, pelo fato de as emissões serem direcionadas à atmosfera por chaminés ou dutos. Essas chaminés devem ser dimensionadas com altura adequada, para garantir que o material emitido seja devidamente disperso (Lora, 2002; Cortez *et al.*, 2009). As edificações vizinhas a essas fontes, com alturas elevadas, podem criar barreiras que dificultam a dispersão dos poluentes. Portanto, o conhecimento da altura de todas as edificações que circundam uma fonte fixa de emissão atmosférica é essencial para prever a altura adequada de uma chaminé.

Tecnologias de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para extrair a altura de objetos imageados na superfície, com base em estereofotogrametria, principalmente na área florestal (Ramli e Tahar, 2020; Birdal, Avdan e Türk, 2017; Díaz-Varela *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2017).

As aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) destacam-se como plataformas para aquisição de imagens de sensoriamento remoto, por serem mais acessíveis, podendo ser equipadas com

câmeras compactas e outros sensores pequenos, conseguindo boa precisão nos produtos finais. Além disso, elas são facilmente manuseáveis, rápidas e versáteis (Moutinho, 2015).

Neste estudo, utilizou-se uma ARP de baixo custo para derivar as alturas das edificações vizinhas a uma indústria, fonte de emissão atmosférica, localizada no município de Irati, estado do Paraná, Brasil. Para isso, uma câmera RGB de consumo foi usada para gerar ortoimagens, que foram usadas para construir o modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital de terreno (MDT) e, por conseguinte, o modelo digital de superfície normalizado (MDSn), através da subtração do MDS do MDT. As edificações foram medidas em campo, através de trena a laser, para comparar-se as alturas medidas com as obtidas no modelo normalizado.

A metodologia do presente estudo ainda não foi utilizada para a aplicação aqui abordada: determinação da altura de todas as edificações que circundam uma fonte fixa de emissão atmosférica, para averiguação da dispersão de poluentes, porém é largamente empregada na área florestal.

## Materiais e método

### Área de Estudo



**Figura 1.** Área de influência (buffer de raio de 300.00 metros) da indústria estudada. Latitude  $-25^{\circ}28'28.90''$ ; Longitude  $-50^{\circ}39'26.56''$ . Escala 1:4.000. Fonte: Os autores.

A área de estudo está localizada no município de Irati, estado do Paraná, Brasil. A principal atividade econômica do município é a agricultura, seguida pela indústria madeireira (Andrade *et al.*, 2010), o que justifica a relevante presença de unidades de secagem de grãos e de indústrias de processamento e laminação de madeira na região. A área sobrevoada localiza-se na região de maior densidade demográfica da cidade. A região de influência desta indústria possui 329.00 edificações (Figura 1).

#### Veículo Aéreo Não Tripulado

O mapeamento da área foi gerado sobre o mosaico de imagens de alta resolução, obtidas através de uma ARP tipo multirrotor, DJI Phantom 4 Pró, nº de série 0AXCF270A30713, com câmera RGB integrada de 14.00 MP. Esse equipamento pesa em média 0.150 Kg e está classificado, de acordo com a ANAC, como RPA Classe 3 (peso máximo de decolagem até 25.00 Kg).

O sensor acoplado é uma câmera compacta RGB, modelo FC6310. A câmera tem uma distância focal de 8.8 mm e o sensor CMOS (13.18 × 8.79 mm).

#### Aquisição e Processamento de Imagens

A área de voo foi definida em aproximadamente 50.00 hectares, objetivando mapear a região de influência circundante ao ponto de emissão em um raio de 400.00 metros, garantindo, assim, a qualidade das bordas dos mosaicos.

A legislação ambiental do Paraná, Resolução SEMA nº16/2014, dispõe que uma chaminé ou duto de emissão de poluentes deve ter altura mínima, 5.00 metros acima da altura da residência mais alta, em um raio de 300.00 metros.

Conforme orientação de Hung *et al.* (2018), é necessário realizar um plano de voo com uma área maior do que a área de estudo, pois geralmente as bordas do mosaico final sofrem distorções devido à menor sobreposição de imagens, por isso, o voo realizado garantiu um raio superior ao regulamentado.

O voo foi pré-programado através do aplicativo livre Pixel4d, com sobreposição lateral de 70% e longitudinal de 85%, velocidade de voo de 5.00 m/s, altitude de voo de até 120.00 metros (400.00 pés) e GSD de aproximadamente 3.00 cm/pixel. Foi utilizada maior sobreposição para se obter um ortomosaico de boa qualidade. O GSD é relacionado com a altura de voo, distância focal da câmera e do tamanho do pixel ( $GSD = (altura\ do\ voo * tamanho\ do\ pixel) / distância\ focal$ ).

O processamento das imagens para criação do mosaico, do MDS (modelo digital de superfície) e do MDT (modelo digital de terreno) foi realizado no software Agisoft PhotoScan (versão demo). Foi aplicada a rotina de processamento sugerida pelo software e seguiram as seguintes etapas:

alinhamento das fotos (align fotos), construção da nuvem densificada de pontos (build dense cloud), construção de modelos (build mesh, e DEM) e geração dos mosaicos de ortofotos (Build orthomosaic). O quadro 01 sintetiza o fluxo de trabalho de processamento.

**Tabela 1.** Rotina de processamento Agisoft Metashape.

Etapa do Processamento		Parâmetros
Align Photo	General	Accuracy: Medium Pair preselection: disabled
	Advanced	Key poin limit: 40.00 Tie point limit 4.00 Constrain features by mask: no Adaptive camera model fitting: yes
Build Dense Cloud	General	Quality: Hight
	Advanced	Depth Filtering: Aggressive Reuse Depth maps: no
Build Mesh	General	Surface type: arbitrary - Source data: dense cloud Face count: medium - Custom face count: 200.00
	Advanced	Interpolation: enabled (default) point classes: all
Build DEM	General	Source data: dense cloud Interpolation: enabled (default) point classes: all
Build Orthomosaic	General	Surface: mesh - blending mode: mosaic color correction: no projection- use custom region: no

Os produtos (ortofotos e modelos) foram gerados utilizando georreferenciamento direto, através do sistema de unidade inercial (IMU) em combinação com o sistema de navegação por satélite (GNSS), acoplados à ARP. Portanto, não foram utilizados pontos de apoio no solo, o que acelerou a coleta e processamento dos dados, que ocorreu de forma totalmente automática. Isso, porém, não causou nenhum prejuízo na qualidade dos dados almeçados para o presente estudo.

#### Geração do MDSn

Os modelos (MDS e MDT) e ortomosaico, confeccionados através das imagens de alta resolução, provenientes do voo com ARP, foram carregados no software Quantum Gis (QGis), programa gratuito, licenciado pela GNU (General Public License), baseado em um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

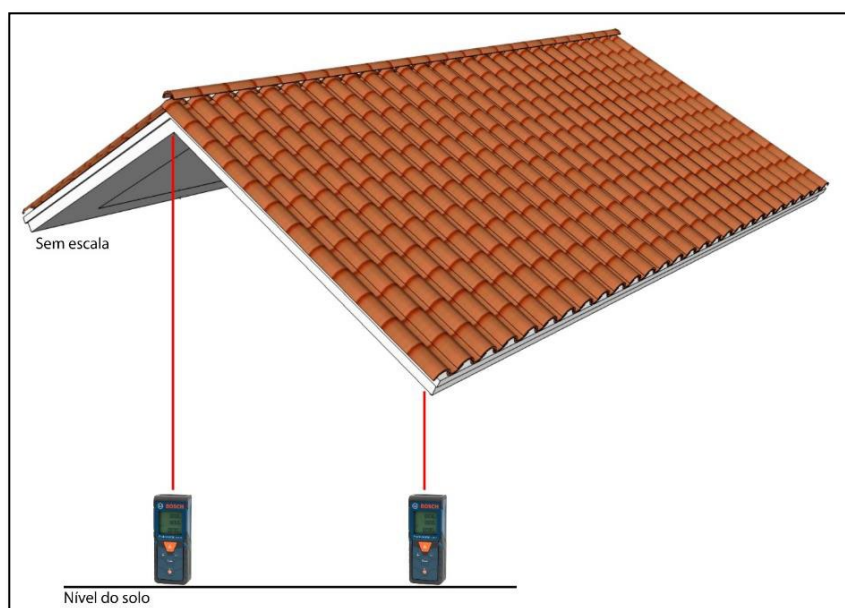
Pelo ortomosaico identificou-se a localização das chaminés da fonte fixa estudada, bem como a área de influência dessas estruturas, através da criação de um buffer de raio de 300.00 (trezentos) metros. Em cada edificação circundante à indústria, foram criados vetores tipo pontos.

A avaliação das alturas das edificações foi realizada a partir dos rasters MDS e MDT, pela criação de um Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSn). Usando o comando “v.what.rast.points”, carregou-se os valores raster nas posições dos pontos vetoriais criados. Em cada ponto, pela diferença dos valores extraídos nos MDS e MDT, estimou-se a altura da edificação.

### Medições de Campo para validação da altura das edificações

As alturas das edificações, determinadas pela diferença entre MDS e MDT, foram estimadas através dos modelos gerados por meio das imagens de alta resolução obtidas por ARP.

Para validação do método, foram medidas, em campo, as alturas de uma amostra de 70.00 edificações localizadas próximo à empresa estudada, em um raio de 300.00 metros. As medidas foram realizadas por trena a laser marca Bosch, modelo Professional GLM 40, precisão de 1.5 mm. As edificações medidas foram selecionadas de acordo com a facilidade de acesso às regiões verticais abaixo aos cumes e/ou beirais, respeitando-se a autorização dos proprietários. As medidas obtidas pela trena foram somadas a 0.13 m, referente ao caibro dos telhados. A seguir, vê-se imagem ilustrando a forma e os pontos de mensuração das edificações para validação dos dados.



**Figura 2.** Pontos de medidas das alturas das edificações amostradas para validação dos dados. *Fonte: Os autores.*

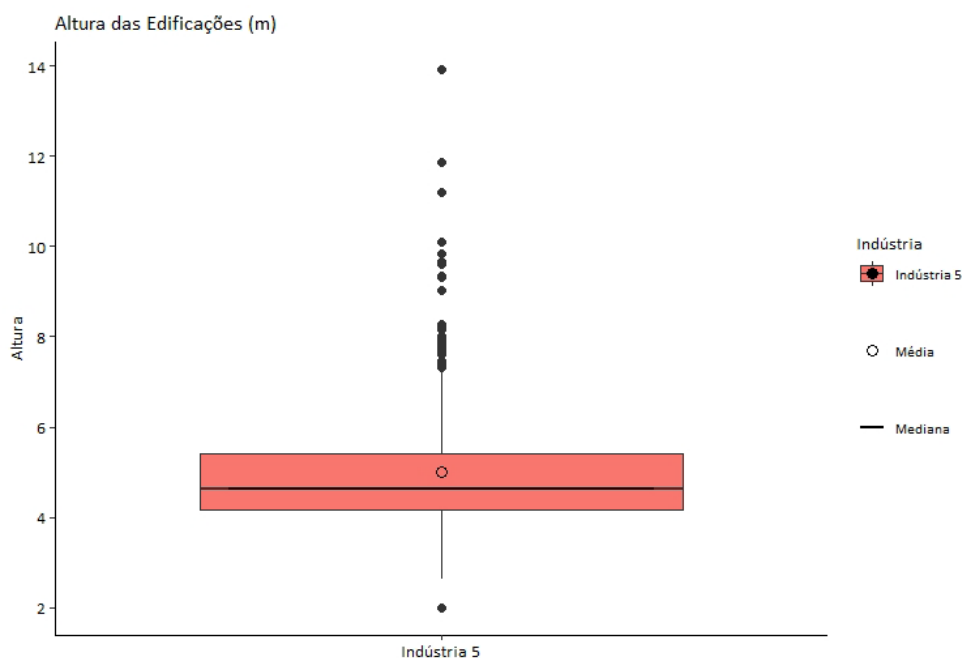
### Análise de Resultados

Inicialmente, com a posse dos dados de alturas das edificações obtidos dos modelos, foram traçados gráficos do tipo boxplot (diagrama de caixa). A estatística descritiva permitiu realizar inferências sobre as edificações situadas na área de influência da fonte de emissão, obtendo informações do padrão das alturas das edificações e da presença de construções superiores a esse padrão (outliers).

Em seguida, a fim de se comparar as medidas realizadas através das imagens de alta resolução com as obtidas em campo, para validação do método, utilizou-se, como indicadores estatísticos, a correlação de Pearson e o cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e do erro médio absoluto. Os cálculos e gráficos foram realizados por meio do software R-4.0.3 para Windows.

### Resultados e discussão

As alturas (H) das edificações ao redor da fonte fixa (indústria) analisada foram mensuradas através da diferença entre MDS e MDT. Os valores da média aritmética, desvio padrão, mínimo, máximo e mediana das alturas (H) das edificações estimadas pelos modelos são apresentados na tabela 02 e no gráfico do tipo boxplot (Figura 3).



**Figura 3.** Boxplot das alturas (H) das edificações estimadas através dos modelos (MDS e MDT).

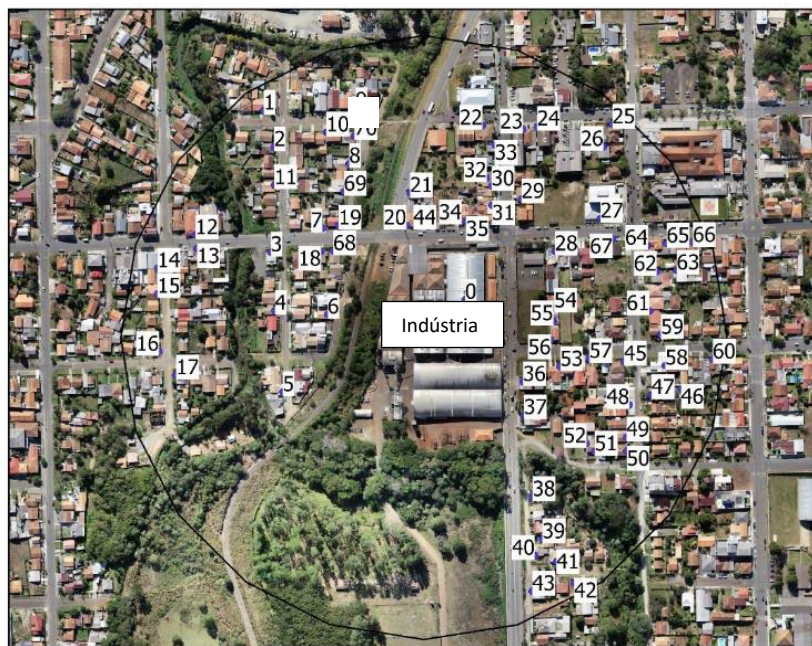
**Tabela 2.** Dados da estatística descritiva das alturas (H) das edificações na área de influência da indústria estudada (alturas extraídas dos modelos).

Estimativa	H
Média	5.01
Desvio Padrão	1.52
Mínimo	1.98
Máximo	13.93
Mediana	4.63
Número de edificações	329.00

De acordo com os dados extraídos dos modelos (MDS e MDT), as edificações ao redor da indústria possuem, em sua maioria (75% das edificações vizinhas), alturas (H) entre 4.00 e 5.50 metros, aproximadamente. A edificação de maior altura (H) possui aproximadamente 14.00 metros.

#### Validação dos dados

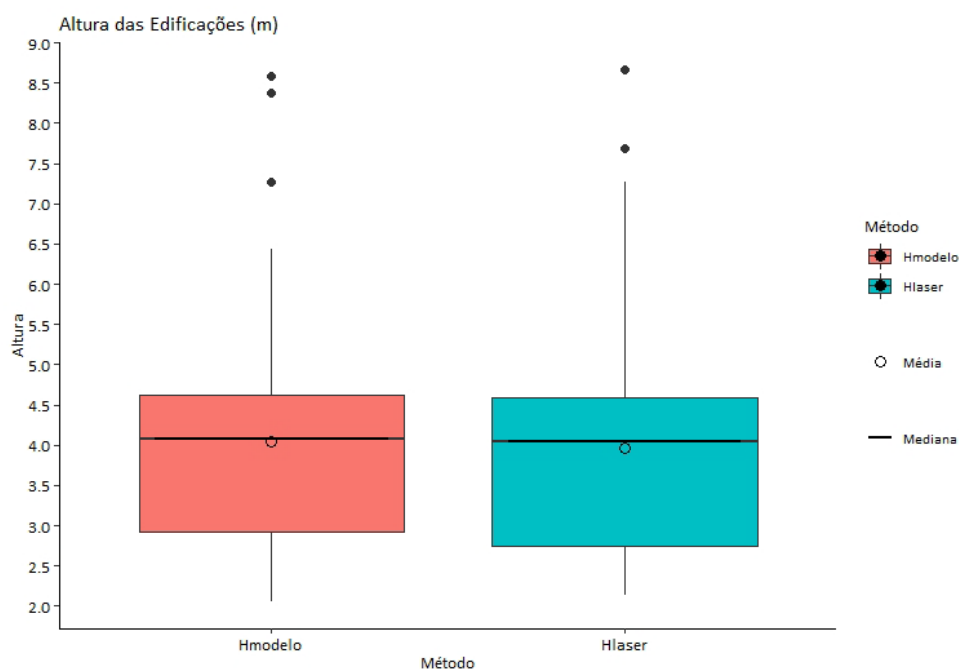
O trabalho de validação consistiu na comparação entre as alturas medidas em campo, através da trena a laser, e as alturas recuperadas através dos modelos (MDS e MDT), para 70.00 amostras de edificações, localizadas na área de influência da indústria. As edificações amostradas representam 22% do total de edificações inseridas na área de influencia. A figura 4 apresenta a localização das edificações amostradas.



**Figura 4.** Localização das edificações amostradas. Fonte: Os autores.



A Figura 5 apresenta o boxplot dos dados das alturas (H) das edificações amostradas, extraídas dos modelos (MDS e MDT) e medidas em campo com trena a laser. Os valores da média aritmética, desvio padrão, mínimo, máximo e mediana, das alturas (H) das edificações amostradas, na área de influência da indústria, são apresentados, nessa ordem, na Tabela 3.



**Figura 5.** Boxplot das alturas (H) das edificações amostradas, extraídas dos modelos (Hmodelo) e medidas em campo com trena a laser (Hlaser).

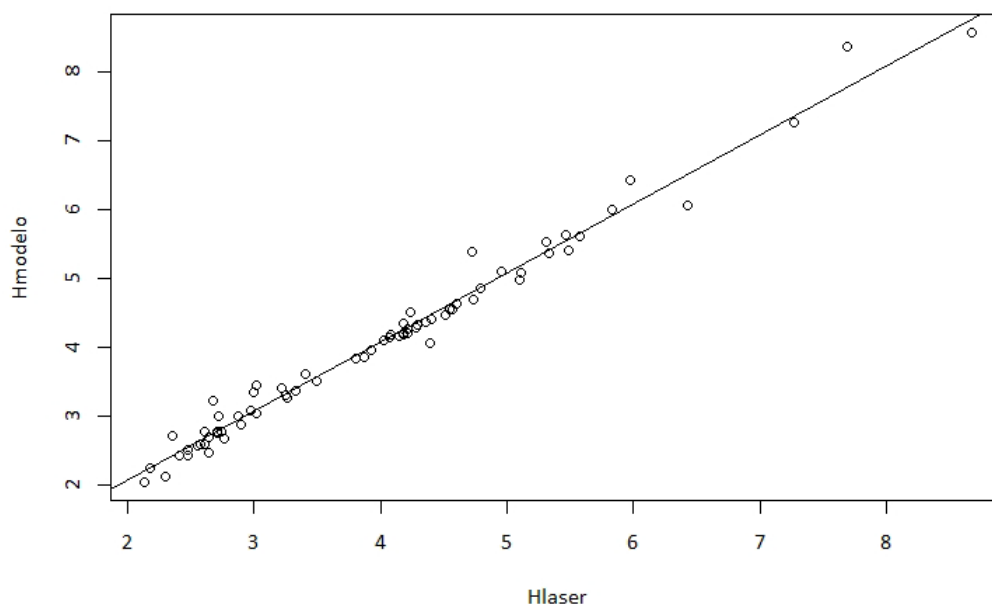
**Tabela 3.** Dados da estatística descritiva das alturas (H) das edificações amostradas para validação dos resultados.

Estimativa	Hmodelo	Hlaser
Média	4.04	3.96
Desvio Padrão	1.38	1.36
Mínimo	2.05	2.13
Máximo	8.58	8.67
Mediana	4.08	4.04
Número de amostras	70.00	70.00

A análise de comparação entre as alturas (H) medidas em campo (laser) e estimadas nos modelos foi realizada usando, como indicadores estatísticos, o coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e erro médio absoluto. Os resultados destas análises podem ser observados na tabela 4. A Figura 6 apresenta a dispersão das alturas das edificações com base nos modelos e medidas de campo.

**Tabela 4.** Resumo da comparação entre as alturas (H) obtidas através dos modelos gerados (Hmodelo) e das medições de campo com trena a laser (Hlaser).

Estimativa	HlaserxHmodelo
$R^2$	0.99
RMSE	0.20 m
R-RMSE	4.93%



**Figura 6.** Gráfico de dispersão das alturas (H) das edificações, obtidas a partir dos modelos (Hmodelo) em comparação com as medidas de campo (Hlaser).

Os resultados mostram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0.90, o que indica uma forte correlação. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) é de aproximadamente 0.20 m, sendo um valor análogo ao encontrado por outros autores que utilizaram metodologia similar e também concluíram que o uso de ARP é uma tecnologia acessível economicamente,

flexível e ágil e que, na aplicação apresentada, pode ser empregada em rotinas de fiscalização e planejamento para construção e adequação de indústrias fontes de emissão atmosférica, sem a necessidade de investimentos em equipe especializada e equipamentos de alto custo.

Ramli e Tahar (2020), usando metodologia equivalente para a estimativa de altura de árvores, com sobreposição de imagens frontal de 80% e lateral de 65%, altura de voo 70.00 metros, tiveram uma RMSE de 0.577m, com GSD de 2.95 cm/pixel. Birdal, Avdan e Türk (2017) também utilizaram veículos aéreos não tripulados de baixo custo com câmera de consumidor para obter alturas de árvore e obtiveram uma correlação de 94% e um erro quadrático médio (RMSE) de 28.00 cm. Zarco-Tejada, Diaz-Varela, Angileri e Loudjani (2014) quantificaram a altura de árvores de um dossel descontínuo usando uma câmera de baixo custo, a bordo de uma ARP, e obtiveram um R2 de 0.83 e uma RMSE de 35.00 cm.

Para que as chaminés desta indústria ultrapassem as edificações inseridas na área de influência, de acordo com a legislação do estado do Paraná, SEMA nº 16/2014, que dispõe que a chaminé deve ter no mínimo 5 metros de altura acima da residência mais alta em um raio de 300 metros, é necessário um porte mínimo de aproximadamente 19.00 metros acima do solo. Cinco metros somados à edificação de maior altura, que possui 13.93 metros, obtido pelo método proposto.

### Conclusões

A geração automática da informação altimétrica de edificações, através da diferença entre modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais de terreno (MDT), obtida a partir de imagens de alta resolução adquiridas com uma aeronave remotamente pilotada, embarcada com câmera de baixo custo, é de grande utilidade para o planejamento de novos projetos de fontes de emissão atmosféricas e diagnóstico dos já existentes.

De uma maneira geral, a metodologia apresentada neste trabalho se mostrou viável para determinação da altura das edificações inseridas na área de influência de fontes de emissão atmosférica, importante na análise do dimensionamento dos dutos dessas fontes.

Conforme foi visto neste estudo, a comparação entre os valores das alturas obtidas pelo procedimento proposto e os valores das alturas medidas através da trena a laser indica que a metodologia possui potencial para análise da altura das edificações com o intuito de averiguar a dispersão de poluentes atmosféricos. A validação realizada medindo 70.00 edificações na área de influência da indústria estudada demonstrou os seguintes erros na estimativa: RMSE de 20.00 cm e R-RMSE = 4.93%, resultando em R2 de 0.99.

As chaminés e/ou dutos de emissão atmosférica da indústria analisada, devem ter porte mínimo de 19.00 metros, 5.00 metros acima da maior residência inserida na área de influência desta indústria, para garantir a diluição dos efluentes lançados.

Este estudo destaca que uma metodologia de baixo custo, baseada em câmeras a nível de consumidor, a bordo de sistemas não tripulados comerciais e uso de um software livre com código-fonte aberto, pode fornecer precisões semelhantes àqueles mais complexos e caros, usados frequentemente em aplicações ambientais.

### Referências bibliográficas

- Andrade, A. R., Roseghini, W. F. F., Mendonça, F. D. A. (2010) Análise do Campo Térmico da cidade de Irati/PR: primeiros experimentos para a definição do clima urbano. *Revista Brasileira de Climatologia*, **6**, 57-78.
- Birdal, A. C., Avdan U., Turk 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>
- Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., Olivares Gómez, E. (2009) *Biomassa para energia*. Editora Unicamp. Campinas/SP. 2008. 733 pp.
- Díaz-Varela, R., Larosa, Raúl de, León, L., Zarco-Tejada, P. (2015) High-Resolution Airborne UAV Imagery to Assess Olive Tree Crown Parameters Using 3D Photo Reconstruction: application in breeding trials. *Remote Sensing*, **7**, (4), 4213-4232. doi:10.3390/rs70404213
- Engel-Cox, J., Oanh, N. T. K., Donkelaar, A. V., Martin, R. V., Zell, E. (2013) Toward the next generation of air quality monitoring: Particulate Matter. *Atmospheric Environment*, **80**, 584-590. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.016>
- Hung, M. N. W. B., Sampaio, T. V. M., Schultz, G. B., Siefert, C. A. C., Lange, D. R., Marangon, F. H. S., Dos Santos, I. (2018) Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. *Raega*, **43**, 215-231. <https://doi.org/10.5380/raega>
- Lora, E.E.S.(2002) *Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte*. 2a ed., Interciência, Rio de Janeiro, 482 pp.
- Moutinho, O. (2015) *Evaluation of Photogrammetric Solutions for RPAS: Commercial vs Open Source*. Dissertação de Mestrado – Engenharia Geográfica Universidade do Porto, 120 pp.
- Ramli, M. F., Tahar, K. N. (2020) Homogeneous tree height derivation from tree crown delineation using Seeded Region Growing (SRG) segmentation. *Geo-Spatial Information Science*, **23**(3), 195-208. <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1805366>
- Souza, C. H. W. de, Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., Magalhães, P. S. G. (2017) Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. *International Journal Of Remote Sensing*, **38**(8), 2218-2230. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1285082>
- Zarco-Tejada, P.J., Díaz-Varela, R., Angileri, V., Loudjani, P. (2014) Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal Of Agronomy*, **55**, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>
- WHO-World Health Organization (2021). *New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution*. Copenhagen and Geneva.