

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DE GEOGRAFIA

Luan Carlos Tomé dos Reis

**ACURÁCIA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS COM UAV EM  
RELAÇÃO A DADOS SRTM E LIDAR**

Porto Alegre

2021

Luan Carlos Tomé dos Reis

**ACURÁCIA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS COM UAV EM  
RELAÇÃO A DADOS SRTM E LIDAR**

Orientador: Prof. Dr. Laurindo Antonio  
Guasselli

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Geografia  
do Departamento de Geografia, do Instituto  
de Geociências, da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul.

Porto Alegre

2021

Tomé dos Reis, Luan Carlos

Acurácia de Modelos Digitais de Elevação obtidos  
com UAV em relação a dados SRTM e LiDAR / Luan Carlos  
Tomé dos Reis. -- 2021.

57 f.

Orientador: Laurindo Antonio Guasselli.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Bacharelado em Geografia, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Modelo digital de elevação (MDE). 2. Light  
Detecting and Ranging (LiDAR). 3. Unmanned Aerial  
Vehicle (UAV). I. Guasselli, Laurindo Antonio, orient.  
II. Título.

Luan Carlos Tomé dos Reis

**ACURÁCIA DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS COM UAV EM  
RELAÇÃO A DADOS SRTM E LIDAR**

Orientador: Prof. Dr. Laurindo Antonio  
Guasselli

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Geografia  
do Departamento de Geografia, do Instituto  
de Geociências, da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Kátia Kellem da Rosa  
UFRGS

---

Prof. Dr. Rafael da Rocha Ribeiro  
UFRGS

Dedico este trabalho a todos que fizeram e  
fazem parte de meu caminho nesta coisa tão  
incerta e curiosa chamada vida!

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela estrutura, recursos e, principalmente, por ter possibilitado a continuidade de meus estudos para obtenção do título de Bacharel em Geografia, algo tão sonhado ao longo dos últimos anos.

Aos professores, pelos ensinamentos, orientações e conselhos divididos durante as aulas e saídas de campo.

Ao professor Laurindo Antonio Guasselli, em especial, pelo acolhimento, ensinamentos e sabedoria compartilhados, e pela paciência e exigência ao longo do desenvolvimento deste trabalho, desde o projeto inicial.

Aos colegas de curso e amigos que sempre, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta jornada.

Ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Caxias do Sul/RS, especialmente ao Engº. Rossano Belladonna, ao Geól. Tiago de Vargas, ao Engº. Volnei Dal Bosco e ao Engº. Márcio Adami pelos incontáveis e incessantes ensinamentos e pelo incentivo para a continuidade de meus estudos em geografia.

À empresa Garden Projetos, por ter aberto as portas ao mercado de trabalho e compreendido o papel do Geógrafo como profissional essencial nos mais variados projetos desenvolvidos.

À empresa Atagon Geoinformação e Ambiente, pelo fornecimento de equipamentos, estrutura e horas de trabalho e por representar, além da concretização de um sonho, a solidificação de minha atuação profissional.

Aos amigos e sócios Marcos e Luis e à minha companheira de vida Caroline, pela paciência e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, à minha família, especialmente minha mãe Laura, pelo imensurável esforço e apoio dedicados para minha formação pessoal e acadêmica.

## RESUMO

A obtenção e interpretação de levantamentos planialtimétricos da superfície terrestre são indispensáveis para o desenvolvimento das atividades humanas. Porém, estes podem se tornar onerosos econômica e temporalmente, a depender da metodologia utilizada e, mais ainda, se consideradas as constantes transformações ambientais que alteram a topografia em curtos intervalos. É imprescindível a comparação e validação dos diferentes métodos de obtenção e processamento de dados topográficos, e dos modelos de representação da superfície gerados. Desta forma, este trabalho compara a acurácia altimétrica de Modelos Digitais de Elevação (MDE), considerando as principais metodologias para obtenção de dados planialtimétricos: topografia convencional/clássica, sensoriamento remoto orbital, levantamentos aerofotogramétricos e sistemas de varredura laser. Foram obtidos MDE oriundos da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de escaneamento a laser do tipo *Light Detecting and Ranging* (LiDAR) e de aerofotogrametria com *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Os dados dos MDE foram obtidos a partir de uma malha de pontos amostrais e a sua avaliação e comparação a partir da análise de: média, desvio padrão e raiz do erro médio quadrático (REMQ ou *RMSE – root mean square error*) das amostras; e aplicação de testes estatísticos. Os resultados evidenciaram boa acurácia do MDE obtido com UAV e concluiu-se que os MDE oriundos deste sensor possuem acurácia elevada quando comparados ao MDE LiDAR, e acurácia mais elevada quando comparados ao MDE SRTM. O tipo de uso e cobertura do solo influenciou negativamente na qualidade dos dados oriundos de UAV. Nenhum dos MDE avaliados foi estatisticamente semelhante ao MDE LiDAR utilizado como modelo base para as comparações.

**Palavras-chave:** Modelo digital de elevação (MDE), *Light Detecting and Ranging* (LiDAR), *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de cobertura final da missão SRTM: o número de passagens do sensor varia de 0 a 4, para regiões de terra e/ou água.....	16
Figura 2. Representação dos sensores da nave espacial Endeavour.....	17
Figura 3. Sensores do satélite ALOS .....	18
Figura 4. Área de abrangência do sensor ALOS PALSAR em uma de suas versões de dados. ....	19
Figura 5. Representação de escaneamento do tipo ALS .....	21
Figura 6. Mapa de localização da área de estudo de caso, município de Caxias do Sul/RS.....	27
Figura 7. Mapa de localização e abrangência da cena SRTM1S30W052V3, e delimitação da área estudos.....	29
Figura 8. Mapa de localização das ortofotocartas que recobrem a área estudos. ....	30
Figura 9. (A) Conjunto rádio controle + smartphone para operação de UAV/RPA; (B) UAV/RPA nº PP 386250001 em posição de decolagem.....	31
Figura 10. (A) Demarcação com tinta do marco geodésico código 687; (B) Marco geodésico código 23. ....	32
Figura 11. Mapa de localização da malha amostral definida para este estudo. ....	35
Figura 12. Modelos Digitais de Elevação. ....	38
Figura 13. Gráficos de correlação MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV <sub>mdt</sub> / UAV <sub>mds</sub> . ....	39
Figura 14. Mapa de diferenças altimétricas entre MDE LiDAR e os demais MDE. ...	41
Figura 15. Gráficos de correlação entre amostras do tipo “Edificação” entre MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV <sub>mdt</sub> / UAV <sub>mds</sub> . ....	44
Figura 16. Gráficos de correlação entre amostras do tipo “Maciço de Vegetação” entre MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV <sub>mdt</sub> / UAV <sub>mds</sub> . ....	44
Figura 17. Gráficos de correlação entre amostras do tipo “Outros” entre MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV <sub>mdt</sub> / UAV <sub>mds</sub> . ....	44
Figura 18. Mapa de diferenças altimétricas dos MDE em relação as classes de uso e cobertura do solo.....	45



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variação das altitudes nos MDE, na área total e na malha amostral. ....	37
Tabela 2. Altitudes médias e desvio padrão nos MDE, na malha amostral.....	37
Tabela 3. Diferenças altimétricas nos MDE, por intervalos métricos, na malha amostral.....	40
Tabela 4. Comparação entre as altitudes do MDE LiDAR e os demais MDE, considerando valores reais e absolutos. ....	40
Tabela 5. Valores de média e desvio padrão para os MDE, nas classes de uso e cobertura do solo.....	42
Tabela 6. Valores de RMSE entre MDE LIDAR e os demais para as classes de uso e cobertura do solo.....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ALOS - *Advanced Land Observing Satellite*  
ALS - *Aerial Laser Scanning*  
ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil  
GCP - *Ground Control Points*  
GNSS - *Global Navigation Satellite System*  
GPS - *Global Position System*  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IDW - *Inverse Distance Weighted*  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*  
LIDAR - *Light Detecting and Ranging*  
MDE - Modelo Digital de Elevação  
MDS - Modelo Digital de Superfície  
MDT - Modelo Digital de Terreno  
NASA - *National Aeronautic and Space Administration*  
NIMA - *National Imagery and Mapping Agency*  
PALSAR - *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*  
PRISM - *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*  
RCMGEO - Rede Caxiense de Marcos Geodésicos  
REMQ - Raiz do Erro Médio Quadrático  
RMSE - *Root Mean Square Error*  
RPA - *Remotely Piloted Aircraft*  
RTK - *Real Time Kinematic*  
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*  
SVL - Sistema de Varredura Laser  
TLS - *Terrestrial Laser Scanning*  
UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivos.....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1	Metodologias para obtenção de dados planialtimétricos .....	13
2.2	Avaliação e aplicação de MDE obtidos por diferentes sensores e técnicas ...	22
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1	Delimitação da área de estudo .....	27
3.2	Obtenção de dados e geração de modelos digitais de elevação .....	28
3.3	Comparação e validação dos modelos digitais de elevação.....	33
3.4	Análise dos dados .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
4.1	MDE área total .....	37
4.2	MDE classificado .....	42
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Antes restrita à transcrição de informações observadas e/ou mensuradas ao nível do solo, como resultado direto da interpretação humana, nas últimas décadas a ciência cartográfica passou por um processo de modernização e transição entre técnicas de aquisição e representação de dados (FERRAZ, 2017). O desenvolvimento de tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento, na esteira da corrida mundial pelo domínio aeroespacial, gerou novas possibilidades de aquisição e manipulação de dados geoespaciais com precisão e qualidade impensadas até meados do século passado (LIU, 2007).

Segundo Liu (2007) a inserção de sensores orbitais, capazes de captura de dados em distintas bandas de frequência, tornou possível (além do imageamento de toda a superfície terrestre) a obtenção de dados topográficos com grande resolução espacial e temporal e, ainda, capazes de alcançar áreas remotas do globo. Estes dados têm se mostrado, há algumas décadas, uma importante ferramenta de auxílio ao desenvolvimento de estudos ambientais e de engenharia, por exemplo.

Atualmente, uma das principais fontes orbitais de dados altimétricos da superfície terrestre (MACÊDO; SURYA, 2018) é a *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), lançada em meados dos anos 2000. O objetivo da SRTM foi obter dados topográficos da superfície da Terra e resultou da cooperação entre a *National Aeronautic and Space Administration* (NASA), *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), nos Estados Unidos, e agências espaciais da Alemanha e Itália (PINHEIRO, 2006).

Ainda que amplamente utilizados ao longo dos últimos 20 anos, fornecendo Modelos Digitais de Elevação - MDE com resolução espacial variável entre 90 m e 30 m (VALERIANO, 2004) os dados SRTM não são as únicas informações topográficas obtidas remotamente e com elevada precisão. O satélite ALOS - *Advanced Land Observing Satellite*, por exemplo, teve por objetivo a observação da atmosfera e da superfície marinha do globo terrestre (FERNANDES, 2019): lançado em meados de 2006 pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) o ALOS fornece dados topográficos com resolução espacial variando entre 30 m e 12,5 m (MACÊDO; SURYA, 2018).

Além do avanço da tecnologia de sensoriamento orbital, a aerofotogrametria com utilização de aeronaves comuns também sofreu grande incremento tecnológico

a partir da segunda metade do século XX (RUIZ, 2015), com a crescente modernização das câmeras de captura de imagens e mesmo das aeronaves que as transportam. Mais recentemente, dois fatos merecem destaque no campo da aerofotogrametria: o desenvolvimento e popularização de (1) aeronaves não tripuladas - UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) - também denominadas aeronaves remotamente pilotadas - RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) e popularmente chamadas de “drone”; e do (2) escaneamento a laser (BECKER *et al.*, 2017) por meio de sistemas como o LiDAR (*Light Detecting and Ranging*).

A união destas tecnologias e sua disponibilização à sociedade tem possibilitado a obtenção de dados altimétricos de alta precisão, capazes de oferecer resultados de qualidade superior aos modelos orbitais e mesmo às técnicas de topografia convencional.

Entretanto, a utilização dos diferentes MDE é limitada a escala de trabalho, devido as diferentes resoluções espaciais e aos métodos de obtenção, sendo imprescindível uma validação da precisão a fim de garantir resultados adequados. Neste sentido, pesquisadores tem comparado a precisão/acurácia de modelos digitais de elevação (MDE) em diversas aplicações.

Macêdo; Surya (2018) compararam dados de elevação, declividade, aspecto, relevo sombreado e rugosidade do terreno, oriundos de SRTM e ALOS PALSAR. Para os autores, o MDE ALOS apresentou os melhores resultados em análises de mega e mesoescalas, enquanto o MDE SRTM, de menor resolução espacial, mostrou-se mais adequado aos estudos em megaescala.

Ao aplicar dados SRTM em projetos relacionados a recursos hídricos, Belladonna *et al.* (2017) propuseram uma metodologia de validação destes dados a partir de diferentes classes de declividades do terreno, comparando-os a dados provenientes de sensor LiDAR. Os resultados evidenciaram maior diferença de altimetria entre os MDE nas regiões com declividades mais acentuadas, com diminuição de erros em regiões suave onduladas e onduladas.

Quanto aos dados obtidos a partir de UAV, diversas pesquisas têm sido feitas no intuito de validar a qualidade das ortoimagens e MDE gerados através destes equipamentos.

Coelho (2015) avaliou a qualidade de dados oriundos de UAV em projetos rodoviários, com resultados que atingiram padrões compatíveis com Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC A. Turner; Lucieer; Jong (2015), Al-Rawabdeh *et*

*al.*(2016) e Fernández *et al.* (2016) utilizaram sistemas UAV para obtenção de dados referentes a zonas com ocorrência de deslizamentos de solo, obtendo resultados com escala de acurácia centimétrica. Barry; Coakley (2013) compararam dados obtidos com UAV e dados oriundos de coletas com GPS do tipo *Real Time Kinematic* - RTK, obtendo nível de 95% de confiança nas amostras avaliadas.

Este trabalho tem por objetivo analisar a acurácia de um Modelo Digital de Elevação gerado a partir de dados obtidos com UAV em relação a MDE existentes para a área de estudo analisada, gerados a partir de dados SRTM e LiDAR. Para tanto, desenvolveram-se etapas de pesquisa bibliográfica e atividades em campo, objetivando a obtenção dos dados topográficos necessários para a elaboração e comparação dos MDE.

## 1.1 Objetivos

### Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é gerar e comparar a acurácia altimétrica de Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos a partir de levantamento aéreo com UAV e diferentes técnicas de sensoriamento remoto.

### Objetivos específicos

- a) Comparar a acurácia vertical dos MDE em relação ao uso e cobertura do solo;
- b) Comparar o MDE obtido com UAV e os oriundos de SRTM e LiDAR;
- c) Avaliar a precisão dos MDE com base em pontos de controle obtidos por levantamento topográfico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Levantamentos planialtimétricos da superfície terrestre representam um fator imprescindível para o desenvolvimento das atividades humanas. Estes, podem se tornar onerosos econômica e temporalmente, mais ainda se consideradas as constantes transformações ambientais que alteram a topografia (COSTA *et al.*, 2010). Assim, torna-se imprescindível a comparação e validação dos diferentes métodos de obtenção e processamento de dados topográficos.

Desta forma, no referencial teórico deste estudo são apresentadas as principais metodologias para obtenção de dados planialtimétricos: topografia convencional/clássica, sensoriamento remoto orbital, levantamentos aerofotogramétricos (aerofotogrametria) clássicos e sistemas de varredura laser.

Ainda, são comparados estudos realizados acerca de cada um dos tópicos e que embasaram o desenvolvimento dos trabalhos, a metodologia utilizada e a discussão dos resultados encontrados.

Para alinhar as definições, cabe diferenciar os modelos digitais que representam a variação altimétrica da superfície terrestre: (1) Modelo Digital de Elevação - MDE; (2) Modelo Digital de Terreno - MDT; e (3) Modelo Digital de Superfície - MDS. O termo (1) MDE é o nome geral dado para informações topográficas e pode descrever dados exclusivamente da superfície do planeta (terra nua) como pode descrever dados que incluem vegetação e estruturas construídas. Na maioria dos casos, os termos comumente utilizados são (2) MDT, que representa um MDE da terra nua, e (3) MDS que inclui vegetação e construções (TAROLLI, MUDD, 2020).

### 2.1 Metodologias para obtenção de dados planialtimétricos

#### **Topografia**

A necessidade de conhecimento do meio ao qual se relaciona fez com que o homem desenvolvesse técnicas e equipamentos para representar o espaço geográfico. Desta forma, a topografia tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas para realizar medições planialtimétricas da superfície terrestre com alta precisão (VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2007).

A topografia pelo método clássico, conforme definida pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994; 1998) tem alta aplicabilidade para obtenção de dados planialtimétricos utilizados em projetos de engenharia diversos, notadamente em grandes escalas cartográficas (GOMES; CARDOSO, 2008). Atualmente o nível de precisão dos aparelhos de medição topográfica atinge níveis em escala milimétrica, garantindo precisão elevada aos levantamentos.

As normativas em vigência para execução de levantamentos topográficos planialtimétricos cadastrais visam a garantia de valores mínimos de acurácia para coleta e representação de dados no território nacional. O Decreto nº 89.817 (BRASIL, 1984) estabelece valores máximos de erro na representação de dados para enquadramento destes em Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC. A norma NBR 13133 (ABNT, 1994) versa quanto às definições mínimas para execução de levantamentos topográficos.

A validação e a amarração de levantamentos topográficos convencionais são realizadas a partir de marcos materializados no terreno, que contêm coordenadas planas e altimétricas conhecidas. A norma NBR 14166 (ABNT, 1998) estabelece os procedimentos e parâmetros básicos para implantação de redes de referência cadastral, compatibilizando:

[...] os procedimentos no sentido de se estabelecer a infraestrutura de apoio geodésico e topográfico que proporcione a normalização e sistematização de todos os levantamentos topográficos, quer pelo método direto (clássico), quer pelo método aerofotogramétrico, ou outro que vier a ser criado, executados em qualquer escala e para qualquer finalidade [...]  
Esta rede, portanto, deve apoiar tanto as atividades cadastrais a serem representadas no Plano Topográfico Local, em escala 1:1000 até 1:1, como os levantamentos destinados à cartografia, inclusive à sistemática, representados em projeção UTM usualmente em escala 1:2000 ou menores. (ABNT, 1998).

Além de apoiadas em redes sistematizadas de referências, as medições planialtimétricas do tipo convencional devem ser realizadas por meio de instrumentos como: teodolitos, níveis, medidores eletrônicos de distâncias (ABNT, 1994) e a partir de aparelhos receptores do sistema *Global Navigation Satellite System* – GNSS.

Sistemas receptores GNSS alcançam desde precisões de aproximadamente 10 m (receptores de navegação) até escalas centimétricas (receptores geodésicos), fornecendo dados planialtimétricos de alta precisão.

A partir dos dados coletados em campo, com utilização de algum(s) deste(s) equipamento(s), são gerados os Modelos Digitais de Elevação - MDE. Estes,



apresentam variações de precisão dependentes do procedimento utilizado na aquisição e interpolação dos dados altimétricos (GOMES *et al.*, 2006).

A qualidade do MDE resulta diretamente da quantidade e qualidade dos pontos cotados obtidos e de sua precisão posicional frente aos marcos adotados como base de referência ao levantamento.

### **Sensores orbitais**

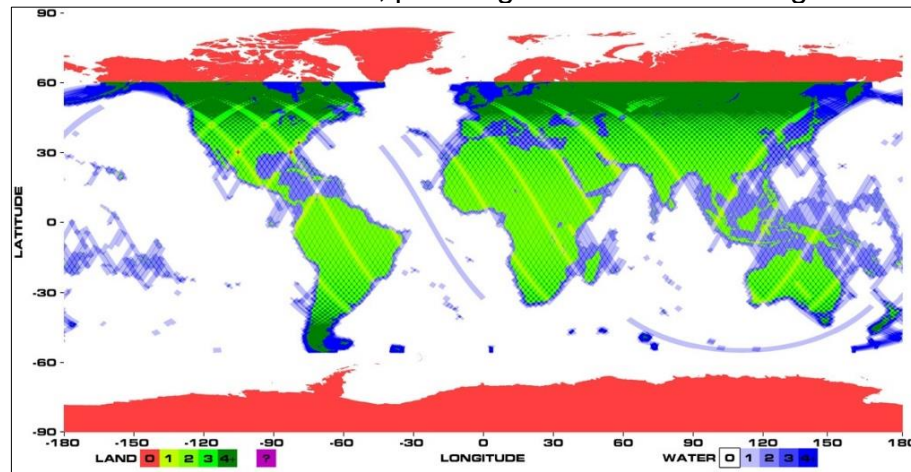
A partir de sensores orbitais é possível a obtenção remota de dados topográficos digitais da superfície terrestre. A topografia digital tornou-se crucial para estudos científicos nas áreas de geologia, geofísica, ecologia, modelagem hidrológica, entre outros. Estes dados também são utilizados como base de monitoramento da superfície durante eventos sísmicos, de vulcanismo e grandes inundações (VAN ZYL, 2001).

Como exemplos de sensores orbitais geradores de dados topográficos digitais pode-se citar os sensores de radar embarcadas na *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e os sensores a bordo do *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS).

#### *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*

A missão SRTM produziu o Modelo Digital de Elevação - MDE mais completo e com maior resolução espacial (90 m) para toda a superfície da Terra. O projeto foi lançado em fevereiro de 2000 a bordo da nave espacial *Endeavour* e resultou da cooperação entre *National Aeronautic and Space Administration* (NASA), *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), dos Estados Unidos, e agências espaciais de Alemanha e Itália (VALERIANO, 2004; RODRIGUEZ *et al.*, 2005; GOMES *et al.*, 2006; FARR *et al.*, 2007; MACÊDO; SURYA, 2018). A superfície de abrangência da missão concentrou-se entre 60° de latitude norte e 56° de latitude sul - aproximadamente 80% da superfície terrestre, Figura 1.

Figura 1. Mapa de cobertura final da missão SRTM: o número de passagens do sensor varia de 0 a 4, para regiões de terra e/ou água.



Fonte: Adaptado de (FARR *et al.*, 2007).

O radar é uma técnica de sensoriamento remoto ativo que emite pulsos de energia, registrados por um sensor no seu retorno. Os instrumentos de radar usam comprimento de onda maior do que os instrumentos LiDAR, por exemplo. Os dados topográficos são tipicamente derivados das bandas de radar X e C, embora a banda L (comprimento de onda de 15-30 cm) também seja usada. Em contraste, LiDAR topográfico normalmente usa comprimentos de onda na ordem das centenas de nanômetros.

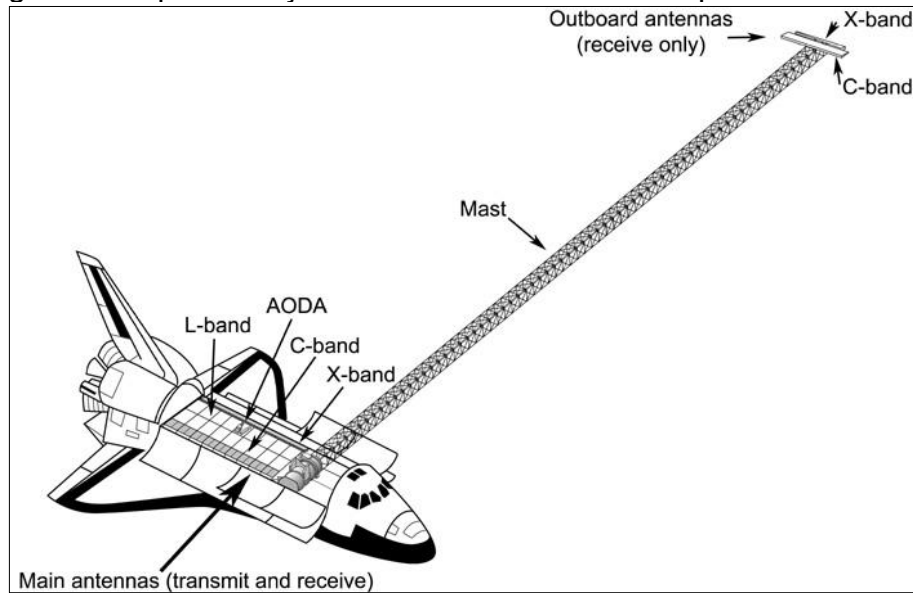
A resolução das imagens de radar depende, em parte, do comprimento de onda utilizado. Como as bandas X e C têm comprimentos de onda relativamente mais curtos, são usados para mapeamentos globais da topografia. Os dados topográficos derivados de instrumentos de radar, como o MDE SRTM (banda C), usam técnicas interferométricas baseadas em radar de abertura sintética (SAR) e não há penetração nas copas das árvores. Esta técnica mede uma mudança de fase entre duas imagens de radar (TAROLLI, MUDD, 2020).

A versão SRTM *version 3* possui melhor acurácia do que as anteriores devido às etapas de processamento envolvidas para a remoção de incoerências nos dados. Preliminarmente, a avaliação da NASADEM sugere um erro vertical RMSE de 2,3 m e Gesch *et al.* (2016) sugere 4,15 m (TAROLLI, MUDD, 2020).

A partir da utilização de duas antenas, Figura 2, InSAR (*Interferometric SAR*) - *C-band system* (C-RADAR) e *X-band system* (X-RADAR) - os produtos derivados de SRTM foram reamostrados para resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m), com erro de altura absoluta vertical linear de menos de

16 m, erro de geolocalização absoluto circular de menos de 20 m e erro de geolocalização relativo circular de menos de 15 m (FARR *et al.*, 2007) para dados da banda C. Para dados da banda X o erro relativo de altura foi de aproximadamente 6 m, utilizados na criação de um MDE de resolução mais alta, porém sem cobertura global (VALERIANO, 2004).

Figura 2. Representação dos sensores da nave espacial Endeavour



Fonte: Adaptado de (FARR *et al.*, 2007).

O ajuste planimétrico dos MDE ocorreu a partir de apoio de campo com levantamentos geodésicos e implantação de pontos de controle através de uma rede de refletores com coordenadas conhecidas.

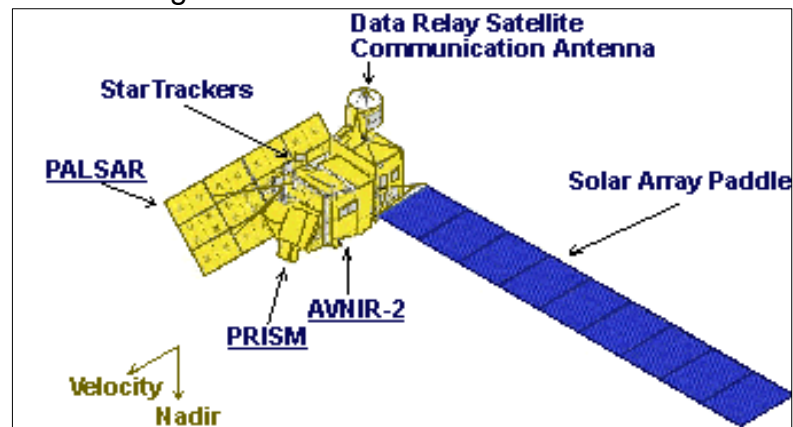
O MDE SRTM foi, inicialmente, disponibilizados com resolução de 30 m apenas para os Estados Unidos e 90 m para o restante do mundo (VALERIANO, 2004). Atualmente, os dados com resolução espacial de 30 m estão disponíveis.

#### *Advanced Land Observing Satellite (ALOS)*

O satélite ALOS foi lançado em janeiro de 2006 pela Agência Espacial Japonesa (*Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA*) e visava a aquisição de imagens para o monitoramento de desastres ambientais, levantamento de recursos naturais e suporte à cartografia (IBGE, 2011), tornando-se um dos maiores satélites de observação da Terra já desenvolvidos (JAXA, 2021).

O ALOS tem três sensores embarcados, Figura 3: PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*); AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer - Type 2*); e PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*). O PRISM obteve imagens pancromáticas com resolução espacial de 2,5 m, com foco em mapeamento digital de elevação. O sensor AVNIR-2, focado em observações de cobertura da superfície, com resolução espacial de 10 m (em bandas RGB e Infravermelho Próximo), apresenta variações no ângulo de visada para imageamento de desastres naturais. O PALSAR é um sensor do tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*), semelhante ao utilizado pela SRTM, com resolução espacial de 10 a 100 m, capaz de obter dados ininterruptamente (dia e noite) e sob qualquer condição atmosférica (IBGE, 2011; JAXA, 2021).

Figura 3. Sensores do satélite ALOS

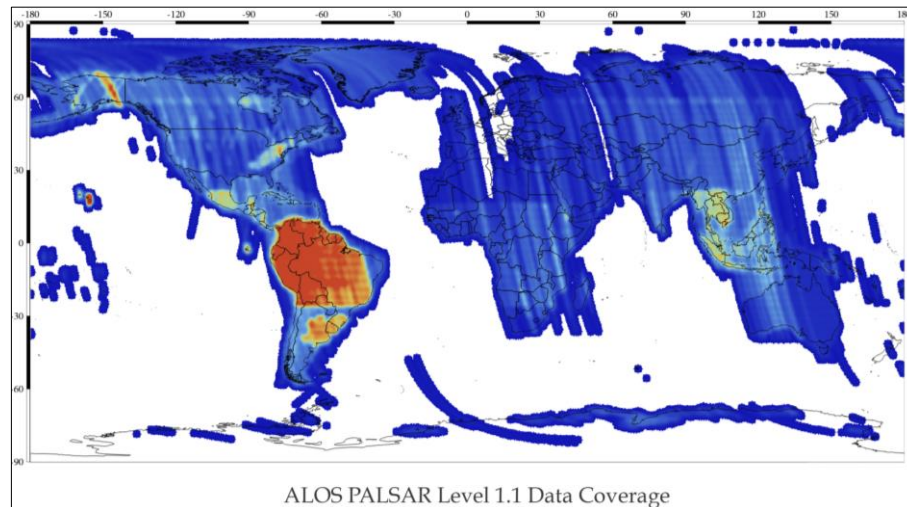


Fonte: disponível em: [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about\\_index.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm).

Os dados oriundos dos sensores ALOS foram calibrados, corrigidos e validados continuamente desde seu lançamento, com acurácia vertical de aproximadamente 9,3 m e 9,8 m para cada MDE, respectivamente (JAXA, 2007).

A abrangência dos dados do satélite ALOS variou em relação a cada um de seus sensores e às etapas de processamento, atingindo áreas distintas da superfície terrestre, conforme ilustrado na Figura 4, em exemplo do sensor PALSAR.

Figura 4. Área de abrangência do sensor ALOS PALSAR em uma de suas versões de dados.



Fonte: disponível em: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-coverage-maps/>.

### **Aerofotogrametria**

A aerofotogrametria é uma das técnicas comumente adotada para obtenção de dados altimétricos da superfície terrestre, possibilitando a geração de MDE a partir de estereoscopia de fotografias analógicas ou digitais (HSIEH; CHAN; HU, 2016). A obtenção de imagens aéreas da superfície teve início na primeira metade do século XIX, fazendo da aerofotogrametria uma das metodologias pioneiras do sensoriamento remoto.

A passagem pelas fases de fotogrametria pioneira (1840-1900), analógica (1901-1950), analítica (1951-1990) e digital (1990-hoje) (COELHO; BRITO, 2007), e a descoberta e aperfeiçoamento do princípio da estereoscopia (BERETTA, 2019) culminaram no desenvolvimento de modernas técnicas de processamento e geração de dados a partir de produtos aerofotogramétricos.

Atualmente, um dos maiores expoentes do avanço tecnológico no campo da aerofotogrametria é a utilização de aeronaves não tripuladas *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), aliadas a câmeras digitais de pequeno porte para o mapeamento aéreo. Devido a vantagens como baixo custo operacional, altitudes de voo relativamente baixas, alta resolução espacial e conveniência operacional, os UAV têm sido amplamente aplicados (HSIEH; CHAN; HU, 2016).

Os MDE gerados a partir de aerofotogrametria – seja ela convencional ou com utilização de UAV – apresentam acurácia variável de acordo com o tipo de sensor de captura de imagens, altitude de voo, taxa de sobreposição de faixas de voo, entre outros. Os dados altimétricos são gerados a partir da área mapeada nas imagens e normalmente tem menor acurácia em áreas com presença de vegetação.

Embora semelhantes ao gerados por sistemas de varredura *laser*, estes MDE diferem quanto à forma de aquisição e processamento dos dados tridimensionais, já que os sensores *laser* são capazes de capturar dados a nível de solo quase sem sofrer interferência da vegetação.

Processos como o de ortorretificação de imagens, antes desempenhados de forma manual e com grande desprendimento de tempo e mão de obra humana, atualmente são desenvolvidos automaticamente por *softwares* dedicados (COELHO; BRITO, 2007), capazes de gerar produtos de elevada precisão.

### **Sistemas de Varredura Laser (SVL)**

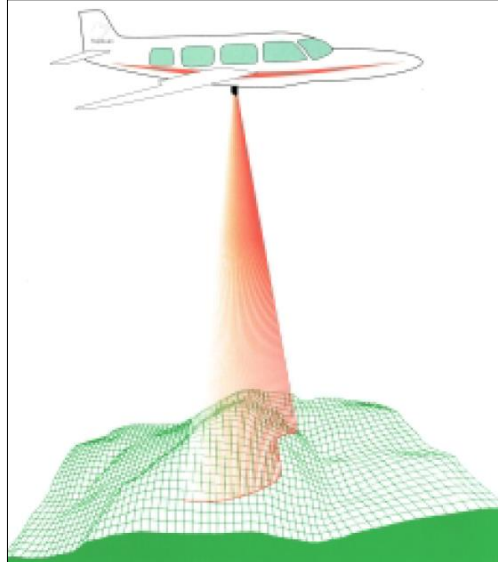
A partir de Sistemas de Varredura a Laser - SVL, é possível obter dados tridimensionais (coordenadas X, Y e Z) de objetos e superfícies, resultando em uma malha de dados denominada “nuvem de pontos” (BARBER; MILLS; BRYAN, 2003). Os SVL dividem-se em dois grupos, definidos a partir da plataforma em que estão embarcados: SVL estáticos; SVL dinâmicos (QUINTERO, 2008). Os sistemas estáticos são estacionários, realizando varreduras a partir de posições fixas. Os SVL dinâmicos realizam varreduras de forma móvel, podendo ser acoplados a veículos e ou mochilas especiais. Estes dividem-se em sistemas terrestres (*Terrestrial Laser Scanning – TLS*) e aéreos (*Aerial Laser Scanning – ALS*), Figura 5.

Um dispositivo *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) possui propriedades óticas que produzem e emitem um feixe de pulsos ou de radiação. Para a aquisição de dados topográficos/altimétricos apenas alguns tipos de lasers têm intensidade e características adaptáveis à esta demanda (SHAN; TOTH, 2008 apud FERRAZ, 2017) como, por exemplo, os do tipo LiDAR (*Light Detecting and Ranging*).

A geração de Modelos Digitais de Elevação – MDE a partir de dados obtidos com escaneamento a laser desenvolveu-se largamente a partir da década de 1990. Estes MDE comumente possuem precisão centimétrica, tais como os modelos

oriundos de levantamentos planialtimétricos tradicionais (WEVER; LINDENBERGER, 1999), e muitas vezes resultam da compilação de dados oriundos de ALS e TLS.

Figura 5. Representação de escaneamento do tipo ALS



Fonte: Adaptado de (WEVER; LINDENBERGER, 1999)

A execução de escaneamento do tipo ALS - LiDAR apresenta semelhanças ao processo de aerofotogrametria (FERRAZ, 2017), sendo realizado com utilização de aeronave (tradicional e/ou remotamente pilotada) a partir da execução de faixas de voo para varredura da área de interesse. Os dados obtidos (nuvem de pontos) são filtrados e processados, obtendo-se o MDE.

A coleta de dados por escaneamento a laser (LiDAR) melhorou a capacidade de medir a superfície da Terra e a cobertura da vegetação. LiDAR é um método de sensoriamento remoto ativo; ele emite milhares de pulsos de luz e detecta o sinal de retorno. O retorno do sinal pode ser registrado como uma forma de onda completa ou então algoritmos podem ser aplicados para extrair pontos discretos, por exemplo, a superfície do solo ou pontos no dossel da vegetação. Os sistemas LiDAR terrestres e aerotransportados normalmente têm precisão de escala centimétrica, e podem gerar dados que penetram no dossel da planta. O LiDAR aerotransportado ou terrestre pode detectar a superfície do solo e obter MDT (TAROLLI, MUDD, 2020).

## 2.2 Avaliação e aplicação de MDE obtidos por diferentes sensores e técnicas

### **Topografia**

As técnicas de topografia convencional são bastante consolidadas na literatura e em manuais técnicos, a exemplo dos elaborados por órgãos como a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Ainda que existam bibliografias específicas ao assunto como, por exemplo, Veiga; Zanetti; Faggion (2007) e Corrêa (2021), geralmente elas dão maior ênfase à definição e explicação detalhada das metodologias a serem realizadas nos levantamentos de campo. Poucos são os estudos que comparam os produtos obtidos a partir de levantamentos topográficos, estando estes focados na descrição e exemplificação de formas de uso destes serviços, como na sua aplicação ao campo da engenharia civil (CORRÊA, 2021).

A aplicação de topografia para obtenção de dados planialtimétricos permite a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) a partir de *softwares* específicos. Gomes; Cardoso (2008) compararam modelos de terreno obtidos a partir de dados de quatro equipamentos topográficos distintos: dois teodolitos (de fabricantes diferentes), uma estação total e um nível de precisão. Os resultados obtidos demonstraram diferenças praticamente nulas entre os modelos.

De modo similar, Gomes *et al.* (2006) analisaram a precisão de plantas planialtimétricas em relação aos pontos obtidos em campo, realizando modelagem digital com utilização de dois softwares e procedimentos manuais. Os resultados mostraram pequenas diferenças entre as modelagens obtidas, evidenciando que o número de unidades amostradas (pontos cotados) e a metodologia de interpolação interferem diretamente na qualidade da modelagem de superfície terrestre.

### **Sensores orbitais**

#### *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*

Os dados SRTM têm sido utilizados como base para pesquisa em diversas áreas científicas. Estudos como os de van Zyl (2001), Valeriano (2004) e Farr *et al.* (2007) exploraram os dados primários obtidos, analisando suas características físicas e técnicas, sua abrangência territorial e as possibilidades de sua utilização como base científica segura. Por outro lado, diversos estudos têm sido desenvolvidos com intuito de validar as informações altimétricas.



Ao analisar o MDE SRTM em áreas com densa cobertura vegetal, Rennó (2009) e Brochado (2015) desenvolveram metodologias visando a atenuação dos efeitos de áreas desflorestadas. De acordo com Rennó (2009) em áreas onde há presença de cobertura vegetal, modelagens com SRTM tendem a ser sensíveis ao dossel arbóreo, acabando por representar este em detrimento ao verdadeiro nível do terreno.

Sun *et al.* (2003) compararam dados de *Spaceborne Interferometric SAR (InSAR)* – tecnologia utilizada na SRTM – e dados LiDAR da *Shuttle Laser Altimeter-02 (SLA-02)* para analisar a influência da vegetação na altimetria. Os resultados demonstram que após a remoção dos efeitos gerados pela cobertura vegetal os dados SRTM e SLA-02 apresentam acurácia praticamente igual. Este fato permitiu aos autores afirmarem que a acurácia absoluta da modelagem SRTM em áreas de ausência ou baixa presença de vegetação pode ser maior que a informada oficialmente pela missão.

Além dos dados originais SRTM, fornecidos pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, para o território brasileiro estão disponíveis dados reamostrados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do projeto TOPODATA. Assim, Brubacher *et al.* (2012) compararam as discrepâncias entre estes três produtos, incluindo diferenças altimétricas. Como resultado, constataram que ambos os modelos gerados a partir de SRTM apresentam discrepâncias frente ao original, porém as diferenças de altitudes atingem valores máximos aproximados de 10 m, sendo um resultado aceitável devido às distorções ocorridas durante os processos de interpolação.

#### *Advanced Land Observing Satellite (ALOS)*

Dados provenientes dos sensores embarcados no ALOS têm sido constantemente avaliados, sendo geralmente comparados aos dados SRTM.

De forma pioneira para o território brasileiro, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) desenvolveu estudos avaliativos da qualidade planialtimétrica (IBGE, 2011) de dados ALOS PRISM, obtendo resultados satisfatórios e condizentes aos informados pela Agência Espacial Japonesa (JAXA).

Ali; Hamada e Onuma (2012) compararam dados altimétricos de MDE oriundos de ALOS PALSAR (10 m), SRTM (30 m) e ASTER GDEM (30 m) a partir de pontos

coletados em solo com aparelho GPS. Souza; Ramos e Marcato Junior (2019) compararam os MDE oriundos do ALOS PRISM (30 m) e do SRTM (30 m). Ambos os autores concluíram que os dados de ALOS foram os que melhor representaram a superfície das áreas analisadas.

Macêdo; Surya (2018) e Fernandes (2019) utilizaram o MDE ALOS PALSAR com resolução de 12,5 m e dados SRTM do projeto TOPODATA (30 m de resolução) para comparar sua precisão em mapeamentos geomorfológicos. Os autores concluíram que o MDE SRTM representa a superfície de forma mais suavizada em comparação ao MDE ALOS, provavelmente devido a sua menor resolução espacial. Sugeriram, ainda, a utilização de dados ALOS PALSAR para estudos em média e grande escala, sendo o SRTM mais adequado à grandes áreas.

Barbosa; Cicerelli; Almeida (2019) compararam os MDE ALOS PRISM e PALSAR. Concluíram que o segundo modelo apresentou maior precisão altimétrica devido à sua característica de obtenção de dados – sensor do tipo radar. Diferentemente do sensor PRISM, que captura imagens estereoscópicas que são posteriormente utilizadas na geração de MDE, o sensor ALOS executa a varredura da superfície sendo capaz, por vezes, de transpor a barreira de áreas com cobertura vegetal.

### **Aerofotogrametria**

O registro fotográfico da superfície terrestre a partir de aerofotogrametria se consolidou através do método clássico e, atualmente, a utilização de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) permite a obtenção de dados rápidos, precisos e a custos relativamente baixos. O avanço tecnológico de UAV ao longo dos últimos anos (EVERAERTS, 2008; COLOMINA; MOLINA, 2014) permite seu uso amplamente eficiente em áreas como agricultura, silvicultura, gerenciamento de trânsito, arqueologia, arquitetura, gerenciamento de emergências e monitoramento de desastres naturais e ambientais (NEX; REMONDINO, 2014).

Diversas análises têm sido executadas para validar a qualidade planialtimétrica de dados oriundos de UAV, tanto em relação à qualidade das ortoimagens quanto da nuvem de pontos subsequente.

Braz *et al.* (2015); Barbosa; Pereira (2017); Deus *et al.* (2017) avaliaram a utilização de ortoimagens e modelos de terreno gerados a partir de UAV em substituição à aerofotogrametria convencional, encontrando resultados amplamente

satisfatórios nos produtos cartográficos produzidos. Ortoimagens obtidas com UAV também são utilizadas para monitoramento de florestas de silvicultura (MARTELLO *et al.*, 2015), quantificação de áreas vegetadas e de solo exposto (CHAVES *et al.*, 2015), mapeamento topográfico cadastral (MATIAS; GUZATTO e SILVEIRA, 2015) e mapeamento de zonas costeiras (KLEMAS, 2015).

Estudos como o de Prokešová; Kardoš; Medved'ová (2010) utilizam dados aerofotogramétricos clássicos para análise do comportamento geomorfológico em áreas de *landslides* (movimentos de massa). A partir da introdução de UAV em estudos semelhantes é possível atualizar os dados para regiões de difícil acesso onde previamente existem apenas dados oriundos de sensores orbitais ou aerotransportados. Neste contexto, a aplicabilidade de dados UAV é discutida por autores como Niethammer *et al.* (2011); Lucieer; Jong; Turner (2014); Giordan *et al.* (2015); Lindner *et al.* (2015); Turner; Lucieer; Jong (2015). De forma semelhante, Manousakis *et al.* (2016) utilizou dados oriundos de UAV para a análise e previsão de eventos de deslocamento rochoso, avaliando as formas do terreno através de nuvem de pontos planialtimétrica.

Em relação aos dados planialtimétricos obtidos a partir de UAV, gerados na forma de nuvem de pontos, o desenvolvimento de análises e validação destes materiais também é latente. Trabalhos como os de Barry; Coakley (2013); Júnior *et al.* (2015) e Fagundes (2016) demonstraram que o MDE gerado apresenta alta precisão, mais ainda quando associado à utilização de pontos de controle obtidos com aparelhos GPS de precisão geodésica

### **Sistemas de Varredura Laser (SVL)**

A utilização de SVL torna-se cada vez mais consolidada para a obtenção de dados planialtimétricos a partir de levantamentos aéreos (*Aerial Laser Scanning – ALS*) ou terrestres (*Terrestrial Laser Scanning – TLS*). Os levantamentos do tipo ALS ocorrem a partir de aeronaves convencionais ou UAV, enquanto os do tipo TLS ocorrem diretamente sobre a superfície terrestre, a partir de veículos ou equipamentos portáteis. Assim, como a utilização de UAV alcançou alta popularidade recentemente, os sensores *laser* também passaram por modernização expressiva e tornaram-se objeto constante de estudos científicos.

Baltsavias (1999); Wehr; Lohr (1999) analisaram os princípios físicos de obtenção dos dados a partir de escaneamento a laser, apresentando os padrões

básicos esperados de acurácia planialtimétrica. Neste sentido, Fröhlich e Mettenleiter (2004) afirmam que a variedade técnica dos produtos atualmente disponíveis no mercado representa um alerta aos usuários quanto a busca por padrões seguros de acurácia destes equipamentos.

Dados gerados a partir de TLS são comumente utilizados em atividades relacionadas à arquitetura e/ou engenharia. Estudos como os de Barber; Mills e Bryan (2003); Alkan; Karsidag (2012); Fan; Atkinson (2015) avaliaram a acurácia de dados de TLS aplicados à grandes escalas, encontrando precisão satisfatória na execução de levantamentos *as built* de estruturas industriais, por exemplo. Muhadi; Abdullah; Kassim (2016) compararam dados de escaneamento TLS a dados obtidos com aparelho GPS do tipo geodésico para áreas de silvicultura, obtendo valores praticamente similares de cotas altimétricas para ambas as metodologias.

Dados oriundos de ALS normalmente são empregados a áreas de média escala, sendo utilizados isoladamente ou em conjunto a dados obtidos com topografia convencional e TLS.

Estudos recentes analisaram a qualidade da nuvem de pontos obtida a partir de escaneamento ALS. Kraus; Pfeifer (1998); Sithole (2001); Ruiz *et al.* (2015) executaram processos de filtragem da nuvem de pontos gerada para refinamento do MDE, enquanto Brandalize (2002) e Tommaselli (2003) avaliaram e compararam a utilização de dados ALS e de fotogrametria convencional, concluindo que sua utilização simultânea é altamente viável.

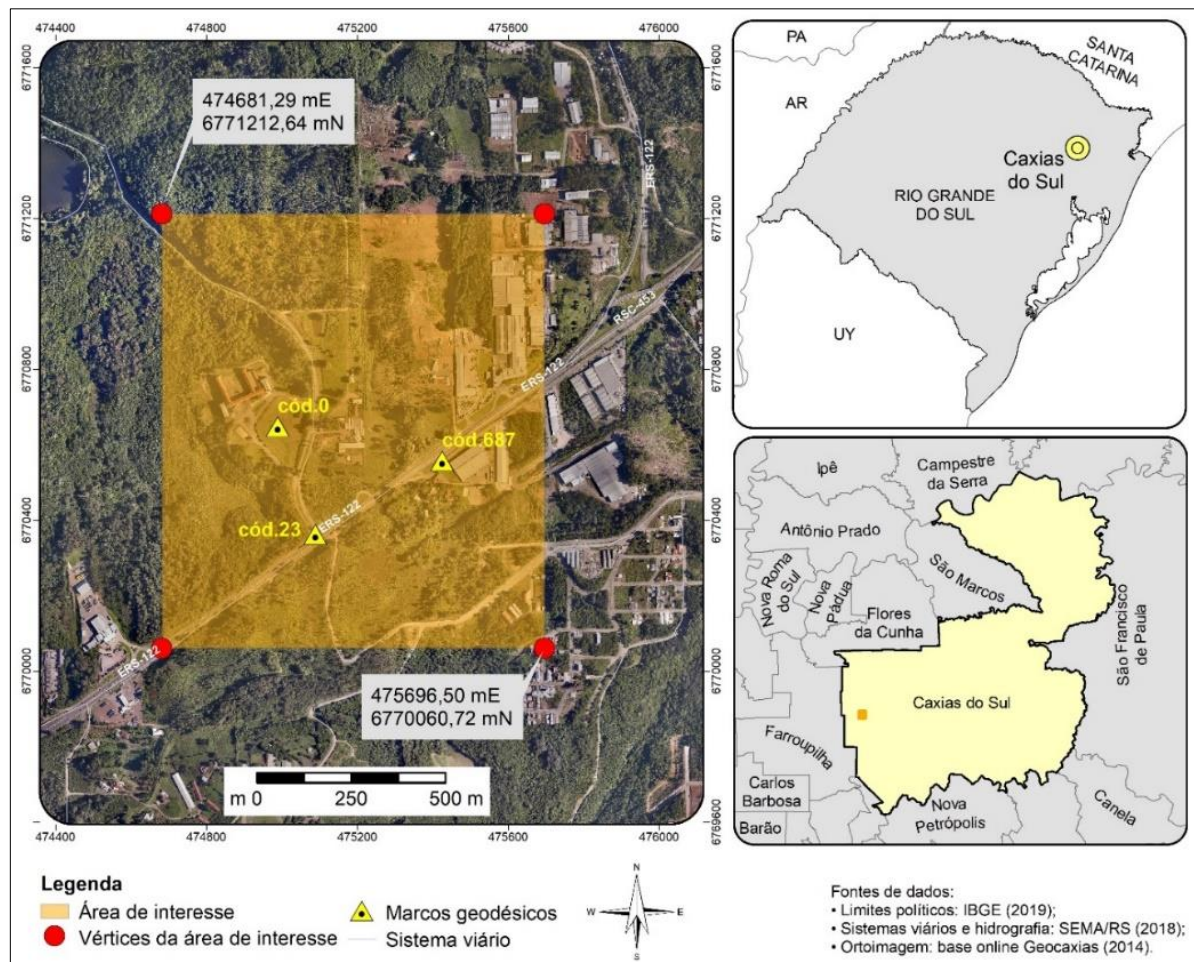
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho foi selecionada uma área no município de Caxias do Sul como estudo de caso e adotados os seguintes procedimentos metodológicos.

#### 3.1 Delimitação da área de estudo

A área adotada com estudo de caso localiza-se no município de Caxias do Sul, na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 6). O relevo é heterogêneo e a altimetria apresenta grande amplitude de variação. Se insere na encosta da Serra Geral, ao sul faz limite com o rio Caí com altitudes próximas a 30 m e ao norte com o rio das Antas com altitudes que variam entre 290 e 430 m. Na região nordeste, se insere no Planalto dos Campos Gerais e as altitudes atingem elevações próximas a 1.000 m (BELLADONA *et al.*, 2017).

Figura 6. Mapa de localização da área de estudo de caso, município de Caxias do Sul/RS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A área selecionada para obter, comparar e validar os MDE está situada na porção oeste de Caxias do Sul, delimitada pelas coordenadas 474681.29 m E, 6771212.64 m N; 475696.50 m E, 6770060.72 m N. Esta área é caracterizada pela presença de maciços de vegetação, edificações industriais e/ou comerciais e áreas de vegetação arbórea e gramíneas.

A heterogeneidade da paisagem é fator relevante para a validação dos MDE, tendo em vista as distorções causadas por elementos como a cobertura vegetal (COSTA *et al.*, 2010) e as variações de declividade (BELLADONA *et al.*, 2017) no produto do modelo altimétrico digital.

A definição da área também levou em consideração a disponibilidade de bases referenciais da Rede Caxiense de Marcos Geodésicos - RCMGeo para georreferenciamento dos modelos a serem comparados. Esta base foi instituída pela Lei Municipal nº 7.229/2010, é composta por 811 marcos materializados e distribuídos no território municipal (a maior densidade dos marcos é na área urbana). Na área de estudo de caso existem três marcos da rede, de códigos nº 0, 23 e 687, e que foram utilizados como pontos de controle para o georreferenciamento do MDE gerado a partir de UAV.

### 3.2 Obtenção de dados e geração de modelos digitais de elevação

#### **SRTM**

Os dados altimétricos oriundos da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram obtidos no sítio virtual *earthexplorer.usgs.gov*, com resolução espacial de aproximadamente 30 m (1 arco segundo) e em arquivo do tipo raster. Foi realizado o *download* da cena SRTM1S30W052V3 (formato GeoTIFF) de modo a recobrir totalmente a área de estudos (Figura 7). As rotinas de processamento dos dados utilizaram o *software ArcMap 10.5*.

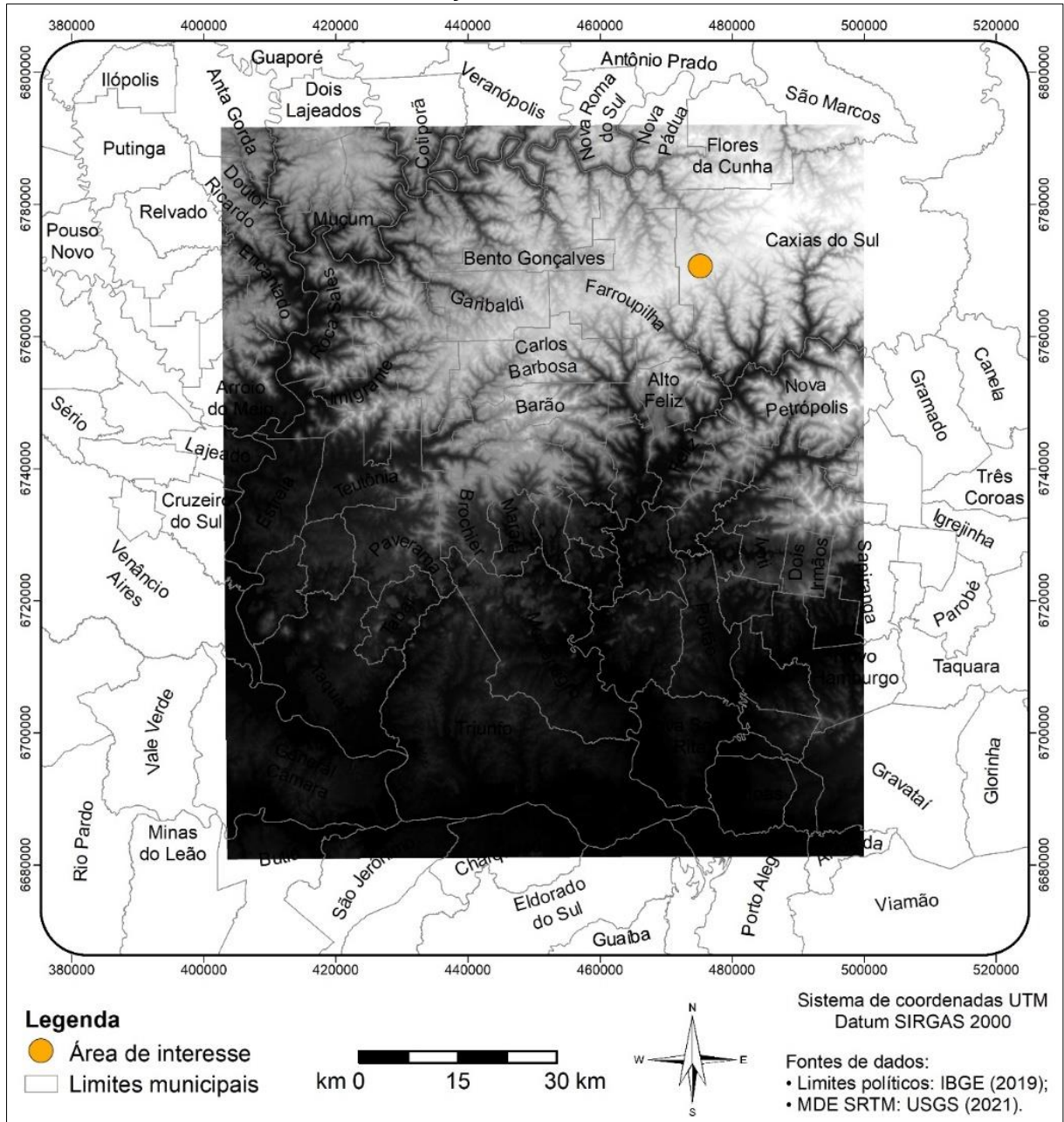
Inicialmente, foi necessário redefinir o sistema de referência cartográfica do arquivo raster (MDE), obtido na projeção original Datum WGS84.

Devido à grande escala de análise deste trabalho, próxima a valores de 1:1000, fica impossibilitada a utilização do MDE SRTM referenciado a sistemas de coordenadas geográficas, tais como WGS84, sendo necessária sua conversão para sistema de coordenadas planas. Através da ferramenta *Project Raster*, foi feita a conversão do MDE para o sistema de coordenadas planas UTM, *Datum SIRGAS*



2000. Foi utilizada a ferramenta *Extract by Mask* para o recorte do MDE para a área de interesse, descartando-se as áreas adjacentes.

Figura 7. Mapa de localização e abrangência da cena SRTM1S30W052V3, e delimitação da área estudos.



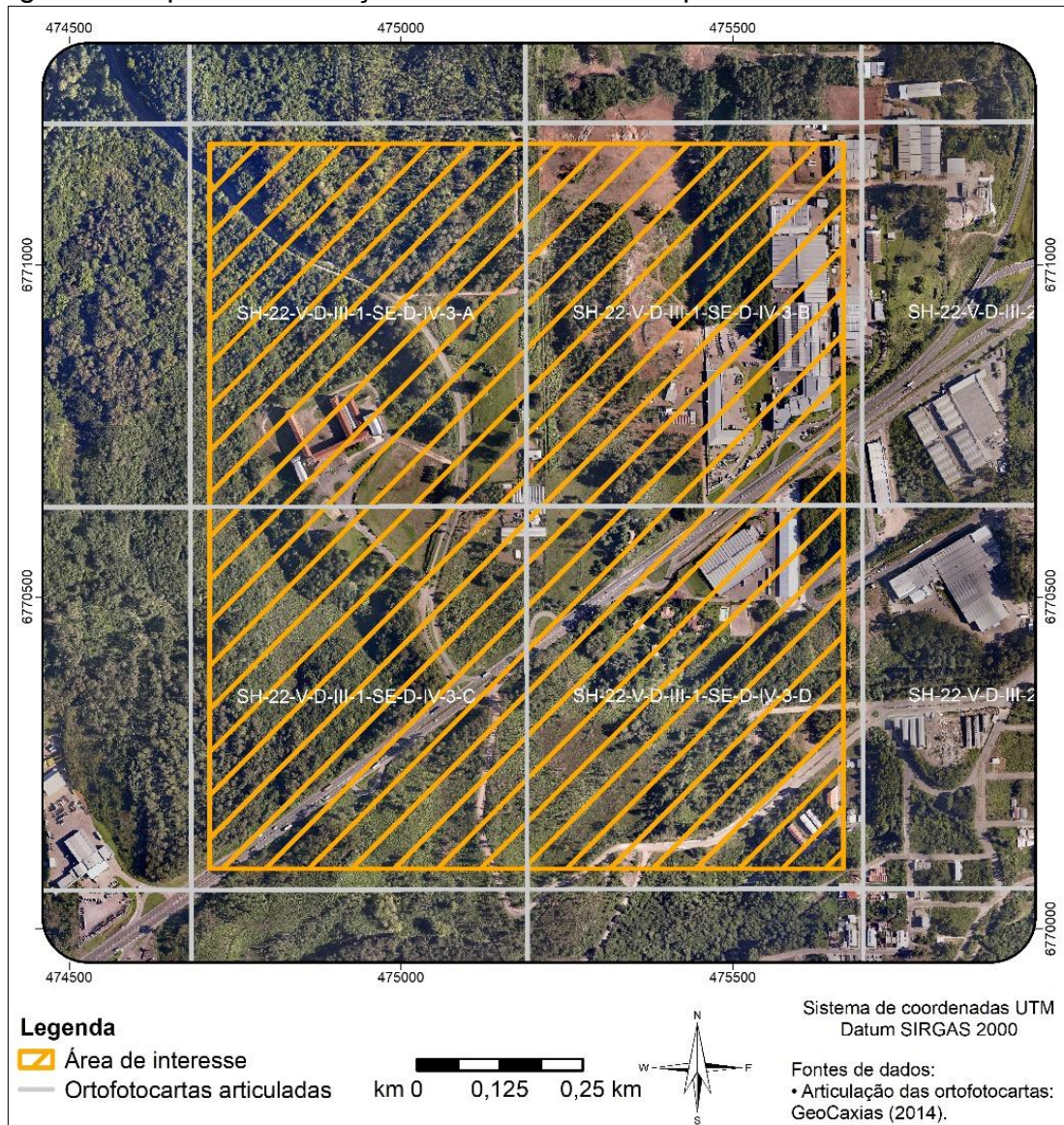
## LIDAR

Os dados gerados a partir de escaneamento a laser do tipo *Light Detecting and Ranging* (LiDAR) foram obtidos da biblioteca virtual de dados disponibilizada pela

Prefeitura de Caxias do Sul, a partir do portal *geopublico.caxias.rs.gov.br*, em formato .dwg (compatível com softwares AutoCAD).

Estes dados são originalmente projetados em sistema de coordenadas planas UTM, *Datum* SIRGAS 2000, georreferenciados à Rede Caxiense de Marcos Geodésicos – RCMGeo, não sendo necessária sua conversão de sistema de referência para sua utilização no projeto. São disponibilizados na forma de curvas de nível equidistantes em 1 m oriundas do processamento/tratamento dos dados LiDAR, apresentados a partir de um conjunto de ortofotocartas articuladas. As ortofotocartas utilizadas foram as de código: SH-22-V-D-III-1-SE-D-IV-3-A; SH-22-V-D-III-1-SE-D-IV-3-B; SH-22-V-D-III-1-SE-D-IV-3-C; e SH-22-V-D-III-1-SE-D-IV-3-D (Figura 8).

Figura 8. Mapa de localização das ortofotocartas que recobrem a área estudos.



Fonte: Elaborado pelo autor.



No *software ArcMap* as curvas de nível foram convertidas para formato *shapefile* (.shp), mantendo seus atributos altimétricos originais. Foi executada a interpolação dos dados e gerado o Modelo Digital de Elevação (MDE). O método de interpolação utilizado foi o *Topo to Raster*, com definição do valor 1,0 para o parâmetro *output cell size*. Assim, foi gerado um MDE com resolução espacial de 1 m.

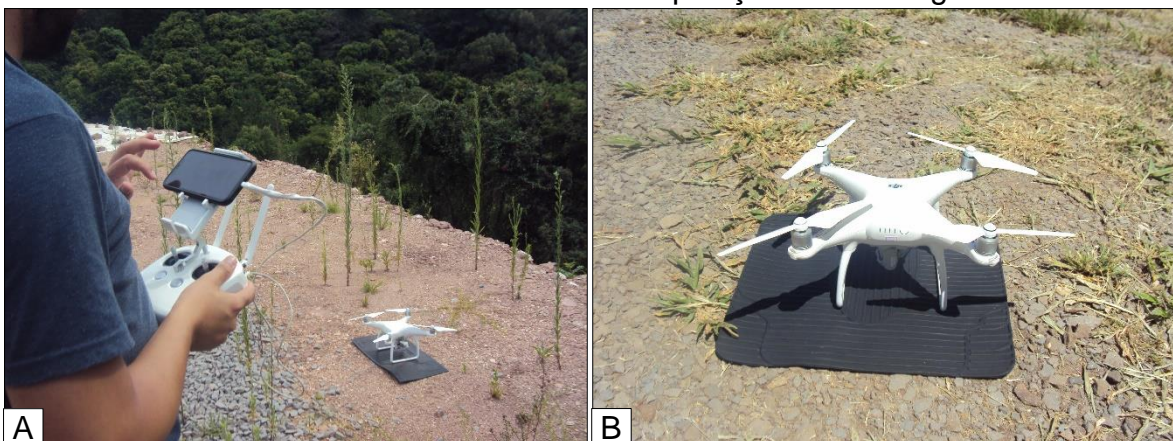
## UAV

A obtenção e processamento dos dados de UAV consistiu na fase principal deste estudo e dividiu-se em 5 (cinco) etapas, a saber: (1) escolha do equipamento UAV utilizado; (2) elaboração do plano de voo para recobrimento da área de interesse; (3) definição e demarcação em campo (com tinta spray na cor vermelha) dos pontos de apoio (*Ground Control Points – GCP's*); (4) execução da fase aeroespacial; e (5) processamento digital das imagens aéreas para geração do MDE.

### Execução do voo e aquisição de dados

O equipamento utilizado para execução do levantamento aéreo foi um UAV modelo *Phantom 4*, marca *Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd*, equipado com sensor de 1/2.3" 12 megapixels e associado a um smartphone de modelo comum, ambos de propriedade da empresa Atagon Geoinformação e Ambiente Ltda (Figura 9). O UAV possui registro na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) sob número PP386250001.

Figura 9. (A) Conjunto rádio controle + smartphone para operação de UAV/RPA; (B) UAV/RPA n° PP 386250001 em posição de decolagem.



Fonte: Atagon Geoinformação e Ambiente Ltda (2021).

A partir do aplicativo *Pix4DCapture*, instalado no smartphone, foi delimitada a poligonal a ser mapeada, as faixas de voo, a altitude e a sobreposição lateral e longitudinal entre faixas.

O desenho da poligonal tomou por referência a área de interesse (aproximadamente 100 ha). A altitude de voo foi pré-definida em 120 m (393 pés, aproximadamente) de modo a atender aos padrões legais, que permitem voos com UAV (ou RPA, segundo legislação brasileira) em altitude máxima de até 400 pés (400 ft). As sobreposições lateral e longitudinal das faixas de voo foram definidas em 60% e 80%, respectivamente.

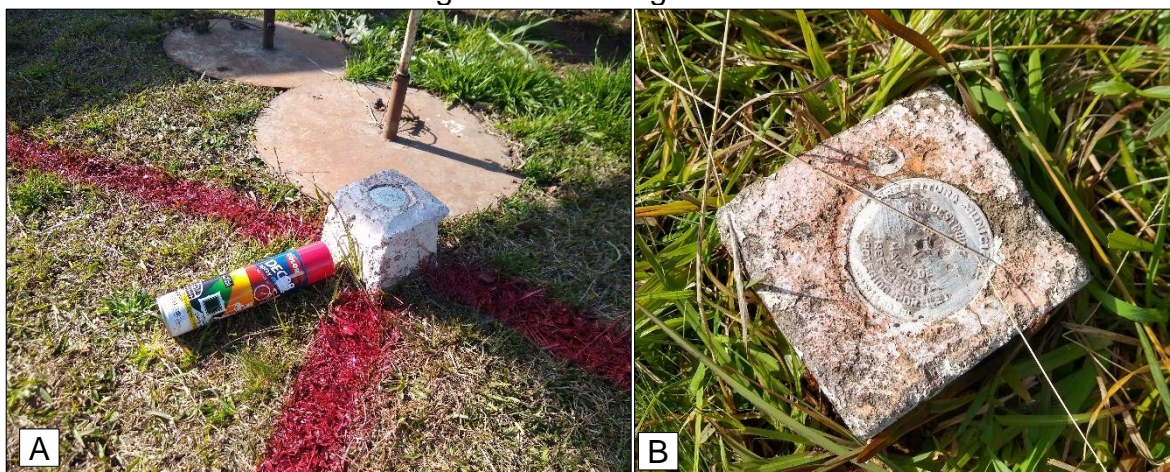
O plano de voo sobrepôs toda a área de interesse e uma área extra adjacente, assim evitando eventuais perdas de dados nas bordas da área em análise.

#### *Ground Control Points (GCP)*

A definição dos pontos de controle em campo (*Ground Control Points – GCP*) para georreferenciamento dos produtos ocorreu a partir da utilização de 3 (três) marcos geodésicos da Rede RCMGeo existentes dentro da poligonal de estudos, previamente identificados (cód. 0, 23 e 687).

Foi realizada vistoria para localização dos marcos e a pintura do solo com tinta na cor vermelha, visando possibilitar a identificação dos pontos nas imagens aéreas.

Figura 10. (A) Demarcação com tinta do marco geodésico código 687; (B) Marco geodésico código 23.



Fonte: Fotos Luan Reis.

## Processamento de dados

Em ambiente de escritório foram desenvolvidas as rotinas computacionais necessárias ao processamento dos dados obtidos por meio do levantamento aéreo com uso de UAV. Inicialmente, foi realizado o *upload* das fotografias aéreas para o *software Pix4DMapper*, responsável pelos processos de alinhamento de imagens, mosaicagem, ortoretificação e geração de curvas de nível e MDE.

Estas etapas são desenvolvidas de forma autônoma pelo *software*, cabendo ao operador/usuário a aplicação de algumas definições quanto às etapas de processamento, inclusive a identificação dos GCP's nas fotografias.

Na etapa de definição dos parâmetros para o processamento das imagens o *software* dispõe duas opções de geração de modelos tridimensionais: (1) Modelo Digital de Terreno (MDT); (2) Modelo Digital de Superfície (MDS). Para efeitos deste trabalho, buscando maior embasamento para comparação de diferentes MDE, optou-se pela geração de ambos os modelos – UAV<sub>mdt</sub> e UAV<sub>mds</sub>.

A geração dos modelos ocorre a partir da nuvem de pontos obtida a partir do processamento das ortoimagens, ou seja, a malha altimétrica utilizada para interpolação pelo *software Pix4DMapper* é a nuvem de pontos cotados. O método de interpolação utilizado foi o *Inverse Distance Weighted* (IDW), que permite apenas utilizar dados de entrada do tipo ponto cotado.

Foram gerados dois arquivos do tipo *raster*: (1) MDT, com resolução espacial de 0,40 m; (2) MDS com resolução espacial de 0,08 m. Como produto derivado desses modelos foram geradas curvas de nível equidistantes em 1 m, em formato *shapefile*.

Para homogeneizar os dados, optou-se pela geração de um novo modelo digital, a partir das curvas de nível originalmente criadas pelo *software Pix4DMapper*, de modo a padronizar o método de interpolação e a resolução espacial dos modelos analisados. O método de interpolação utilizado foi o *Topo to Raster*, com definição do valor 1,0 para o parâmetro *output cell size*. Assim, obteve-se novos MDS e MDT com resolução espacial de 1 m.

### 3.3 Comparação e validação dos modelos digitais de elevação

A partir da obtenção dos 4 (quatro) Modelos Digitais de Elevação (SRTM, LIDAR, UAV<sub>mdt</sub>, UAV<sub>mds</sub>) foi definida a metodologia para validação e cruzamento das informações. Diversas metodologias têm sido utilizadas para definição da malha

amostral para validação posicional altimétrica, inclusive considerando MDE com resoluções espaciais diferentes, como é o caso deste estudo.

Lousada; Fernandes (2017) e Nóbrega; Santos; Cintra (2005) utilizaram malhas de pontos obtidos a partir de levantamento aerofotogramétrico para comparar dados que variaram de 2,5 m a 90 m de resolução espacial.

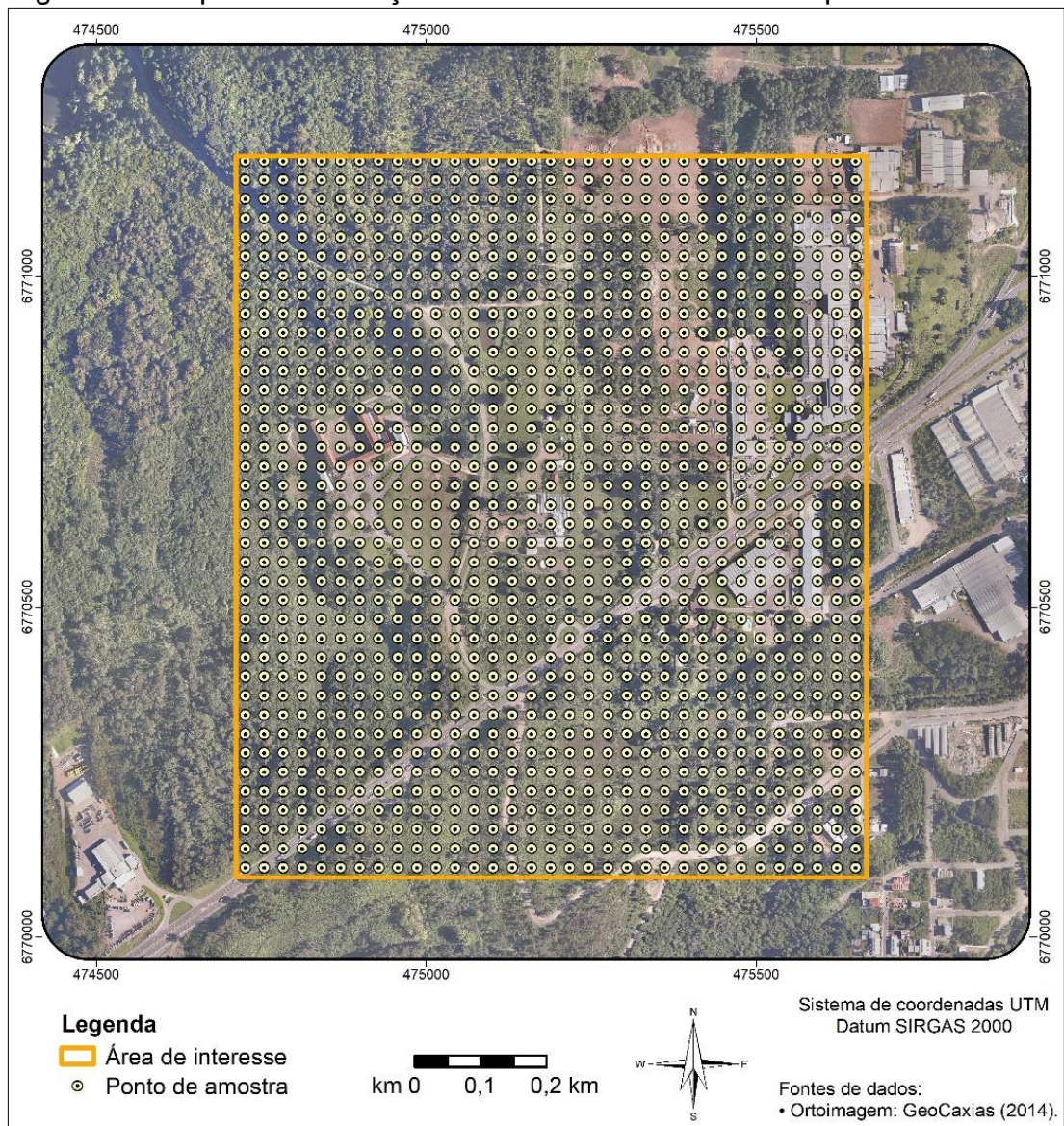
Neste estudo foi aplicada a metodologia utilizada por Belladonna *et al.* (2017), onde é definida uma malha de pontos amostrais homogeneamente distribuídos, segundo critérios previamente estabelecidos, para a coleta de dados altimétricos de cada modelo. Assim, tomou-se por base o MDE SRTM, com resolução espacial de 30 m (menor escala espacial entre os modelos analisados), para geração da malha amostral.

Através da ferramenta *Raster to Point (software ArcMap)* foi criada uma feição vetorial do tipo ponto, em formato *shapfile*, contendo as coordenadas UTM do centroide de cada pixel do MDE SRTM, configurando-se assim uma malha amostral composta por 1.254 pontos (Figura 11).

Foi utilizada a ferramenta *Extract Value to Points* para extrair as informações altimétricas dos MDE para cada unidade da malha amostral. Por fim, os pontos da malha amostral apresentaram em seus atributos as informações altimétricas correspondentes a cada MDE para uma mesma coordenada.



Figura 11. Mapa de localização da malha amostral definida para este estudo.



### 3.4 Análise dos dados

A superfície utilizada como base para a validação e comparação dos dados foi o MDE oriundo do LiDAR. Este MDE teve seus dados georreferenciados e corrigidos a partir da base planialtimétrica da rede RCMGeo, oferecendo elevada precisão.

Buscando analisar de forma mais completa a acurácia dos MDE, foram realizadas duas etapas: (1) comparar dados referentes à toda a área dos MDE, considerando toda a população amostral; e (2) comparar dados a partir da classificação dos pontos amostrais segundo a incidência dos tipos de uso e cobertura do solo.

Para executar a etapa (2), foi realizada uma classificação do uso e cobertura do solo, a partir da vetorização das feições em escala de 1:1.000, sobre a ortoimagem obtida a partir do UAV. Foram atribuídas três classes de uso e cobertura do solo: (a) edificação; (b) maciço vegetal; (c) outros.

As metodologias utilizadas para avaliação e comparação dos MDE, em ambas as etapas (MDE área total e MDE classificado) foram: análise da média e desvio padrão das amostras; aplicação de testes estatísticos.

As diferenças das médias brutas e das diferenças médias foram avaliadas a partir de análise Kruskal-Wallis. As diferenças na dispersão dos valores brutos e das diferenças entre eles avaliados por análise de variância (*one-way ANOVA*). A correlação entre o MDE LiDAR e os demais MDE foi avaliada a partir de regressão linear. Essas análises foram realizadas no *software* PAST 4.03 (HAMMER *et. al.* 1999). A qualidade dos MDE foi avaliada a partir da raiz do erro médio quadrático (REMQ ou *RMSE – root mean square error*), Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (1)$$

Em que:  $d_i$  = diferença de altitude entre os MDE analisados;  $n$  = número pontos amostrais.

## 4 RESULTADOS

A apresentação dos resultados está estruturada em duas etapas: (1) dados obtidos para toda a área do estudo de caso, que consideraram os MDE sem classificação da malha amostral; (2) dados obtidos a partir da análise dos pontos amostrais segundo a incidência da classe de uso e cobertura do solo.

### 4.1 MDE área total

A análise dos MDE, considerando a área total, mostrou as seguintes variações: (a) no MDE LiDAR os valores de altitude variaram entre 696,81 m e 755,84 m, com valor médio de 740,65 m e desvio padrão de  $\pm 6,95$  m; (b) no MDE SRTM variaram entre 715,0 m e 767,0 m, com média de 748,82 m e desvio padrão de  $\pm 7,66$  m; (c) no MDE UAV<sub>mdt</sub> entre 686,88 m e 761,28 m, com média de 742,44 m e desvio padrão de  $\pm 6,33$  m; (d) no MDE UAV<sub>mds</sub> entre 687,69 m e 779,90 m, com média de 746,22 m e desvio padrão de  $\pm 8,23$  m (Tabela 1 e Tabela 2).

Tabela 1. Variação das altitudes nos MDE, na área total e na malha amostral.

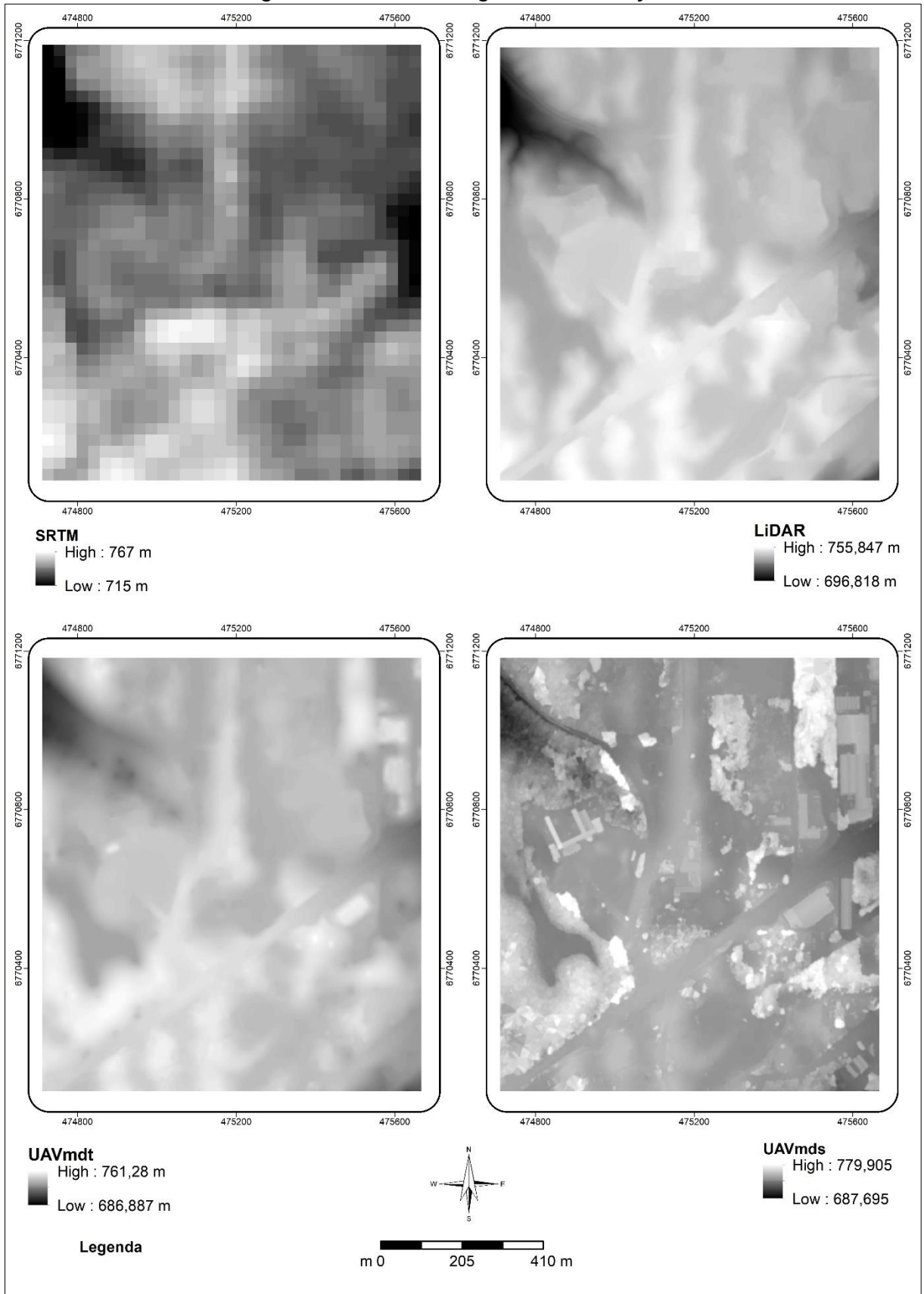
MDE	Área total			Malha amostral (pontos)		
	Altitude mínima (m)	Altitude máxima (m)	Valor diferença (m)	Altitude mínima (m)	Altitude máxima (m)	Valor diferença (m)
LiDAR	696,81	755,84	59,02	701,32	753,50	52,18
SRTM	715,00	767,00	52,00	715,00	767,00	52,00
UAV <sub>mdt</sub>	686,88	761,28	74,39	711,49	755,18	43,69
UAV <sub>mds</sub>	687,69	779,90	92,21	712,09	775,53	63,44

Tabela 2. Altitudes médias e desvio padrão nos MDE, na malha amostral.

MDE	Média	Desvio padrão
LiDAR	740,65	6,95
SRTM	748,82	7,66
UAV <sub>mdt</sub>	742,44	6,33
UAV <sub>mds</sub>	746,22	8,23

Os MDE LiDAR, UAV<sub>mdt</sub> e UAV<sub>mds</sub> apresentaram semelhança visual, mas com diferenças expressivas em relação ao MDE SRTM (Figura 12).

Figura 12. Modelos Digitais de Elevação.



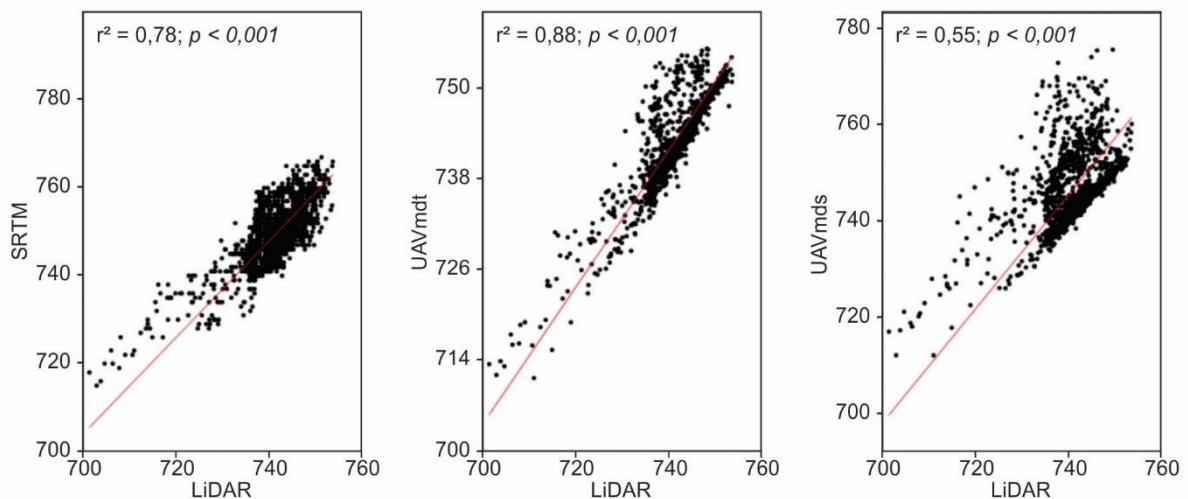
Fonte: Elaborado pelo autor.



Os testes demonstraram diferença entre todos os MDE e o MDE LiDAR, tanto em relação aos valores médios ( $H = 822$ ;  $p < 0,001$ ) quanto na dispersão dos dados ( $F = 316,8$ ;  $p < 0,001$ ). Também as diferenças entre os valores dos MDE SRTM, UAV<sub>mdt</sub> e UAV<sub>mds</sub> em relação ao MDE LiDAR são diferentes em suas médias ( $H = 1033$ ;  $p < 0,001$ ) e na dispersão dos dados ( $F = 424,7$ ;  $p < 0,001$ ).

A regressão linear demonstrou maior correlação entre MDE LiDAR (base altimétrica) e MDE UAV<sub>mdt</sub> ( $r^2 = 0,88$ ;  $p < 0,001$ ), seguida por MDE SRTM ( $r^2 = 0,78$ ;  $p < 0,001$ ) e por MDE UAV<sub>mds</sub> ( $r^2 = 0,55$ ;  $p < 0,001$ ), Figura 13.

Figura 13. Gráficos de correlação MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV<sub>mdt</sub> / UAV<sub>mds</sub>.



As diferenças de altitude entre o MDE LiDAR e os demais MDE foram sintetizadas na Tabela 3. O MDE UAV<sub>mdt</sub> apresenta 59% dos dados com diferença entre 0 e 1 m e apenas 4% com diferença superior a 10 m. E no MDE SRTM, por exemplo, apenas 3% da população amostral apresentou erro (diferenças altimétricas) entre 0 e 1 m e 33% dos dados apresentam erro superior a 10 m.

Embora também oriundo de UAV, o MDE UAV<sub>mds</sub> apresentou erros distintos ao UAV<sub>mdt</sub>: a faixa de erro entre 0 e 1 m é ocupada por 38% da população amostral, enquanto 13% apresentaram erro entre 1 e 2 m e 26 % erro maior que 10 m.

Tabela 3. Diferenças altimétricas nos MDE, por intervalos métricos, na malha amostral.

Diferença altimétrica em relação ao MDE LiDAR	SRTM		UAV <sub>mdt</sub>		UAV <sub>mds</sub>	
	População amostral	% da população	População amostral	% da população	População amostral	% da população
0 a 1 m	36	3%	738	59%	479	38%
1 a 2 m	52	4%	187	15%	169	13%
2 a 3 m	75	6%	70	6%	77	6%
3 a 4 m	115	9%	38	3%	45	4%
4 a 5 m	95	8%	36	3%	34	3%
5 a 6 m	112	9%	31	2%	21	2%
6 a 7 m	95	8%	28	2%	22	2%
7 a 8 m	94	7%	26	2%	25	2%
8 a 9 m	84	7%	23	2%	26	2%
9 a 10 m	83	7%	26	2%	25	2%
> 10 m	413	33%	51	4%	331	26%
Total:	1254	100%	1254	100%	1254	100%

Em relação às diferenças de altitude, tanto absolutas quanto reais, a maior parte dos pontos amostrais apresentou valores mais elevados em relação ao MDE LiDAR (diferença positiva), com um total de 25, 284 e 181 valores negativos para SRTM, UAV<sub>mdt</sub> e UAV<sub>mds</sub>, respectivamente. Os valores de RMSE encontrados foram de 9,51 para SRTM e 9,14 para UAV<sub>mds</sub>. O MDE UAV<sub>mdt</sub> apresentou RMSE de 3,72 (Tabela 4).

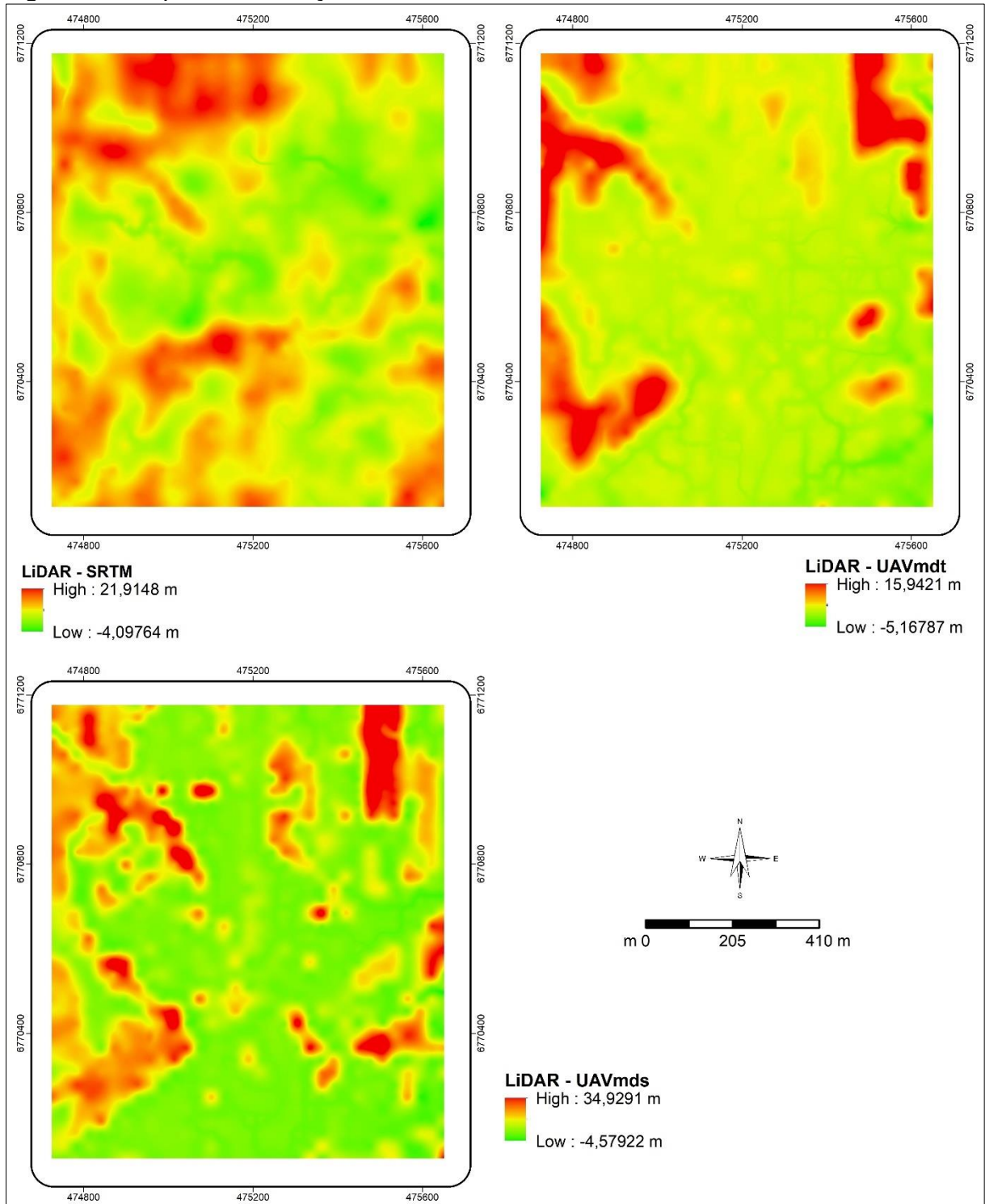
Tabela 4. Comparação entre as altitudes do MDE LiDAR e os demais MDE, considerando valores reais e absolutos.

MDE	$\Delta n(+)$	$\Delta n(-)$	$\Delta H_{real}$		$\Delta H_{abs}$		RMSE
			Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
SRTM	1.229	25	8,17	4,87	8,22	4,79	9,51
UAV <sub>mdt</sub>	970	284	1,78	3,26	2,11	3,06	3,72
UAV <sub>mds</sub>	1.073	181	5,57	7,24	5,71	7,13	9,14

Onde:  $\Delta n(+)$  representa o total de amostras com diferenças positivas;  $\Delta n(-)$  representa o total de amostras com diferenças negativas;  $\Delta H_{\text{real}}$  representa a diferença real e  $\Delta H_{\text{abs}}$  corresponde a diferença absoluta de altitudes entre os MDE analisados e o MDE LiDAR

Para visualizar a variação espacial das diferenças altimétricas entre o MDE LiDAR e os demais MDE, foram elaborados mapas de diferenças (Figura 14).

Figura 14. Mapa de diferenças altimétricas entre MDE LiDAR e os demais MDE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 MDE classificado

Os valores médios de altitude e desvio padrão do MDE LiDAR para as classes de uso e cobertura do solo foram de: (a) edificação 740,05 m  $\pm$ 4,20 m; (b) maciço vegetal 739,72 m  $\pm$ 8,29 m; (c) outros 741,82 m  $\pm$ 5,14 m. Para essas classes de uso e cobertura do solo o MDE SRTM apresentou médias de altitude de 745,11 m, 749,70 m e 748,32 m com desvios padrão de  $\pm$ 5,51 m,  $\pm$ 8,54 m e  $\pm$ 6,57 m. Para o MDE UAV<sub>mdt</sub> as médias foram de 743,27 m, 742,54 m e 742,19 m com desvios padrão de  $\pm$ 4,94 m,  $\pm$ 7,31 m e  $\pm$ 5,14 m. Por fim, o MDE UAV<sub>mds</sub> evidenciou médias de altitude de 748,13 m, 748,90 m e 742,83 m com desvios padrão de  $\pm$ 4,81 m,  $\pm$ 9,53 m e  $\pm$ 5,16 m (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de média e desvio padrão para os MDE, nas classes de uso e cobertura do solo.

MDE	Média			Desvio padrão		
	Edificação	Maciço vegetal	Outros	Edificação	Maciço vegetal	Outros
<b>LiDAR</b>	740,05	739,72	741,82	4,20	8,29	5,14
<b>SRTM</b>	745,11	749,70	748,32	5,51	8,54	6,57
<b>UAV<sub>mdt</sub></b>	743,27	742,54	742,19	4,94	7,31	5,14
<b>UAV<sub>mds</sub></b>	748,13	748,90	742,83	4,81	9,53	5,16

Os valores de RMSE entre MDE LIDAR e MDE SRTM foram: (a) edificação 1,53; (b) maciço vegetal 7,91; (c) outros 5,05. Para as mesmas classes, os valores para o MDE UAV<sub>mdt</sub> foram: (a) edificação 1,27; (b) maciço vegetal 3,44; (c) outros 0,59. Para o MDE UAV<sub>mds</sub> os valores foram: (a) edificação 2,20; (b) maciço vegetal 8,74; (c) outros 1,47 (Tabela 6).

Tabela 6. Valores de RMSE entre MDE LIDAR e os demais para as classes de uso e cobertura do solo.

MDE	RMSE		
	Edificação	Maciço vegetal	Outros
SRTM	1,53	7,91	5,05
UAV <sub>mdt</sub>	1,27	3,44	0,59
UAV <sub>mds</sub>	2,20	8,74	1,47

As análises das diferenças entre os pontos das classes de uso e cobertura do solo evidenciaram algumas diferenças. Nos pontos localizados em edificações, houve diferenças tanto nas médias ( $H = 81,99$ ;  $p < 0,001$ ) quanto na distribuição dos dados ( $F = 36,34$ ;  $p < 0,001$ ). Os MDE que apresentaram semelhança foram MDE SRTM e MDE UAV<sub>mdt</sub>, tanto em relação aos valores médios ( $p = 0,083$ ) quanto na dispersão de dados ( $p = 0,093$ ). Os demais foram diferentes entre si ( $p < 0,001$ , para todos os MDE).

Nos pontos localizados em maciço vegetal, houve diferença entre todos os MDE em relação aos valores médios ( $H = 589,10$ ;  $p < 0,001$ ). Em relação a dispersão dos dados os MDE SRTM e UAV<sub>mds</sub> apresentaram semelhança ( $F = 210$ ;  $p = 0,329$ ) e os demais apresentaram diferença entre si ( $p < 0,001$ ).

Na classe outros houve diferença tanto nas médias ( $H = 374,5$ ;  $p < 0,001$ ) quanto na dispersão dos dados ( $F = 164,2$ ;  $p < 0,001$ ). Os únicos MDE que apresentaram semelhança estatística foram o MDE LiDAR e UAV<sub>mdt</sub> em relação aos valores médios ( $p = 0,115$ ) e de dispersão de dados ( $p = 0,671$ ).

Para a classe de edificação as regressões lineares demonstraram maior correlação entre MDE LiDAR (base altimétrica) e MDE SRTM ( $r^2 = 0,75$ ;  $p < 0,001$ ), seguida por MDE UAV<sub>mds</sub> ( $r^2 = 0,64$ ;  $p < 0,001$ ) e por MDE UAV<sub>mdt</sub> ( $r^2 = 0,61$ ;  $p < 0,001$ ). Para a classe maciço vegetal os resultados demonstraram maior correlação entre MDE LiDAR e MDE UAV<sub>mdt</sub> ( $r^2 = 0,88$   $p < 0,001$ ), seguida por MDE UAV SRTM ( $r^2 = 0,82$ ;  $p < 0,001$ ) e por MDE UAV<sub>mds</sub> ( $r^2 = 0,58$ ;  $p < 0,001$ ). Para a classe outros os resultados demonstraram maior correlação entre MDE LiDAR e MDE UAV<sub>mdt</sub> ( $r^2 = 0,98$ ;  $p < 0,001$ ), seguida por MDE UAV<sub>mds</sub> ( $r^2 = 0,92$ ;  $p < 0,001$ ) e por MDE SRTM ( $r^2 = 0,78$ ;  $p < 0,001$ ).

Figura 15. Gráficos de correlação entre amostras do tipo “Edificação” entre MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV<sub>mdt</sub> / UAV<sub>mds</sub>.

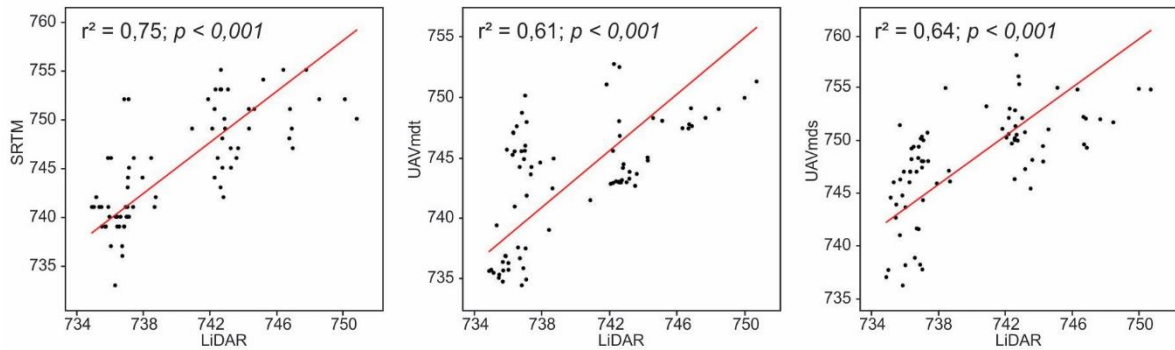


Figura 16. Gráficos de correlação entre amostras do tipo “Maciço de Vegetação” entre MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV<sub>mdt</sub> / UAV<sub>mds</sub>.

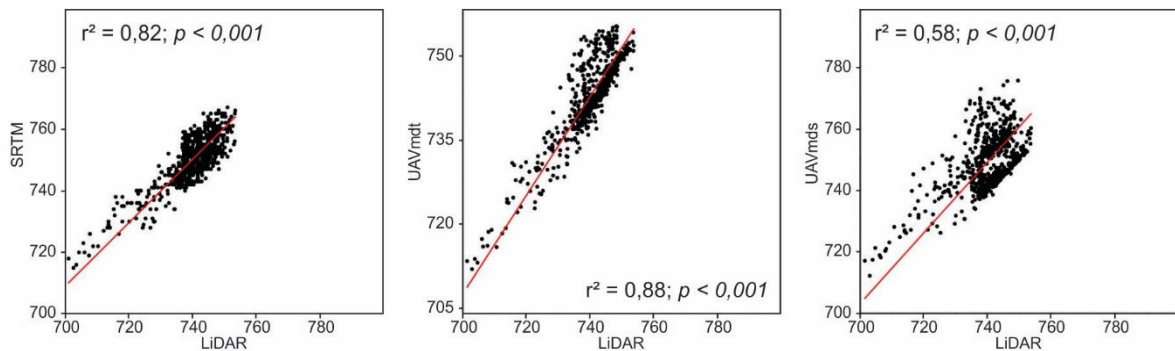
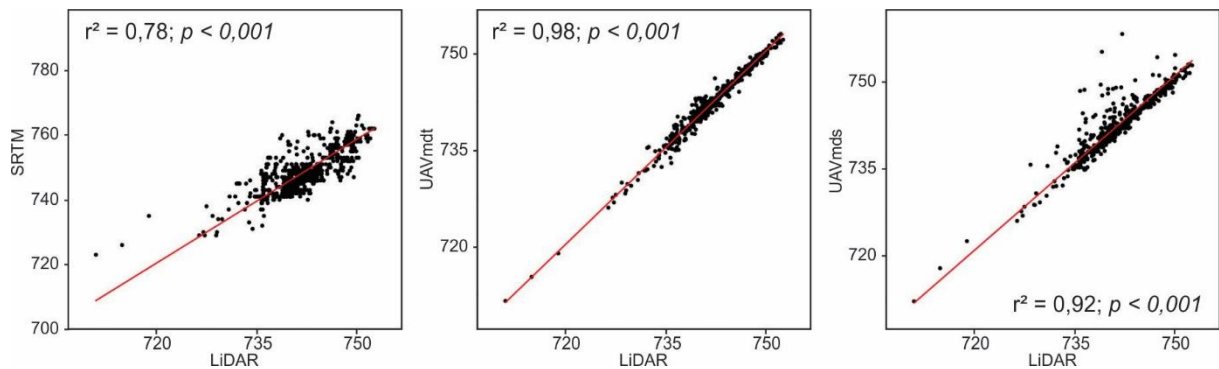


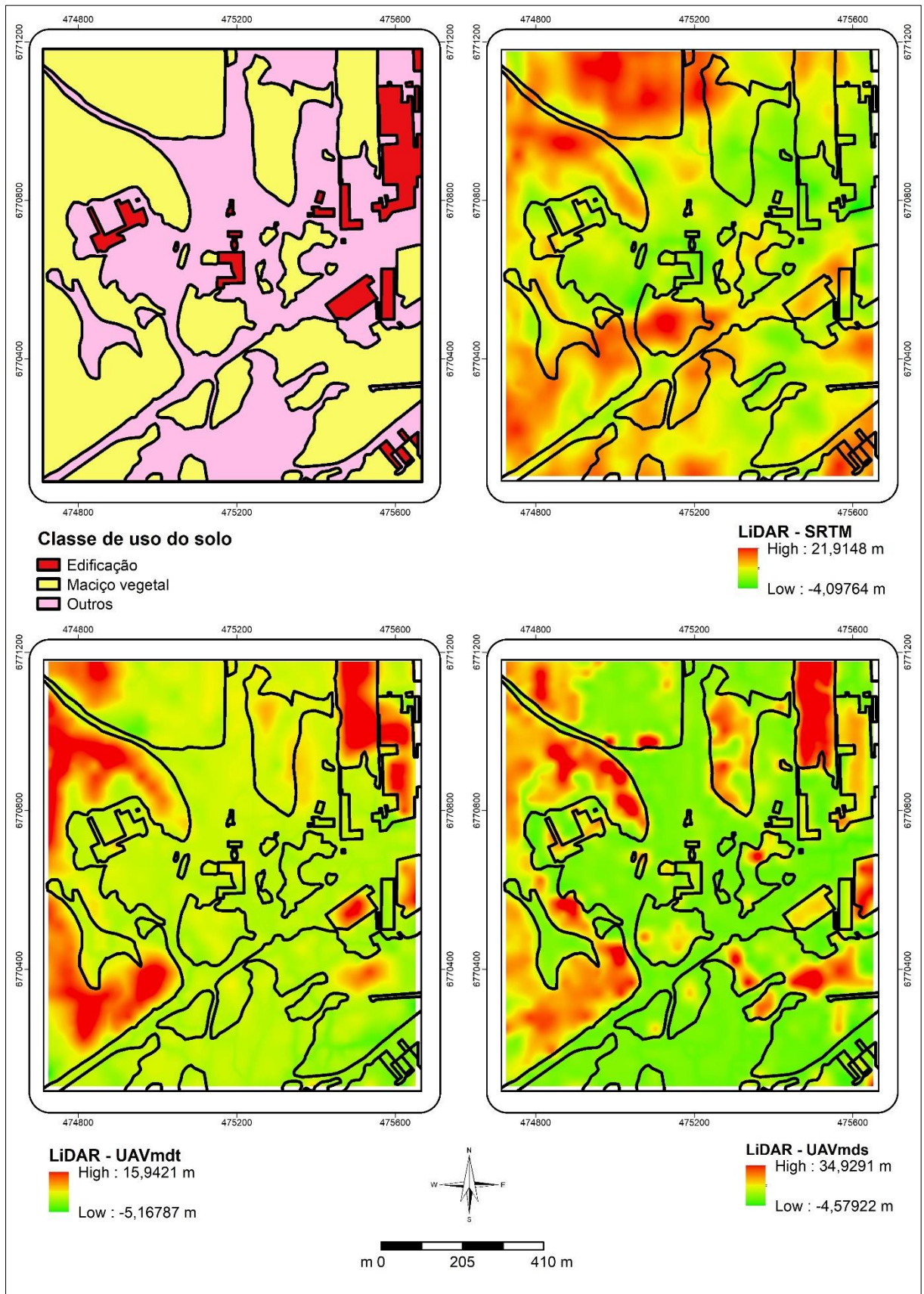
Figura 17. Gráficos de correlação entre amostras do tipo “Outros” entre MDE LiDAR x MDE SRTM / UAV<sub>mdt</sub> / UAV<sub>mds</sub>.



O mapa comparativo, Figura 18, mostra as diferenças entre as classes de uso e cobertura do solo e as cotas altimétricas entre os MDE. As poligonais das classes de uso e cobertura do solo estão apresentadas no primeiro mapa. Nos demais mapas há apenas a sobreposição de seus contornos sobre os MDE, possibilitando visualizar o valor de diferença altimétrica.



Figura 18. Mapa de diferenças altimétricas dos MDE em relação as classes de uso e cobertura do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação entre MDE LiDAR - MDE SRTM os mapas não mostram um padrão espacial nas diferenças entre as classes de uso e cobertura do solo. Entretanto, a comparação entre MDE UAV<sub>mdt</sub> - UAV<sub>mds</sub> evidencia valores mais altos de diferença nas áreas de edificação e maciço vegetal, em ambos os MDE.

## 5 DISCUSSÕES

A avaliação da acurácia de Modelos Digitais de Elevação (MDE) oriundos de distintas fontes de dados é fundamental para a aplicação confiável destes modelos, por exemplo, em análises hidrológicas, espaciais, meteorológicas, geomorfológicas, geológicas, entre outras. É importante destacar que estes modelos não são isentos de erros ou distorções (FERNÁNDEZ *et al.*, 2013; DO CARMO; SOUTO; DUARTE, 2015; JIMÉNEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2017; LUIZ *et al.*, 2017).

A qualidade altimétrica de um MDE é influenciada por diversos fatores inerentes à metodologia aplicada para aquisição dos dados como, por exemplo, ruídos nos sensores, presença de cobertura vegetal, declividade do terreno etc (NEVES *et al.*, 2021). A aplicação do cálculo de RMSE, por exemplo, é um dos métodos utilizados para avaliação da qualidade de diferentes MDE.

É importante comparar MDE de diferentes resoluções espaciais, como em Nóbrega; Santos; Cintra (2005); Belladonna *et al.* (2017); Guasselli; Simioni; Laurent (2020). Neste sentido, destacamos as diferenças de qualidade dos MDE obtidos neste trabalho. O MDE SRTM, por exemplo, tem resolução espacial aproximada de 30 m, enquanto os MDE UAV<sub>mdt</sub> e UAV<sub>mds</sub> de 0,40 m e 0,08 m, respectivamente. Mesmo com estas diferenças é possível identificar feições semelhantes da superfície em todos os modelos, Figura 12, como nas áreas de edificação e estradas existentes.

Em relação a distribuição dos pontos de controle em solo, é importante definir malhas amostrais com conjuntos de pontos que sejam identificáveis nos vários modelos analisados. Em estudos relacionados à análise de movimentos de massa, por exemplo, Prokešová; Kardoš; Medved'ová (2010); Hsieh; Chan; Hu (2016) encontraram dificuldades devido à diferença temporal das imagens e modelos analisados e à dificuldade de acesso nas áreas de estudo. Para Belladonna *et al.* (2017), a definição da malha de pontos de controle não considerou feições visíveis em solo devido à diferença de resolução espacial dos MDE analisados, analogamente ao estudo aqui desenvolvido.



A análise da qualidade altimétrica dos MDE também pode ser a partir da mensuração dos erros obtidos nos modelos e dos erros relativos entre eles. Valores de média e desvio padrão, por exemplo, são utilizados como indicadores de acurácia para comparação de MDE, como em Pinheiro (2006); Costa *et al.* (2010); IBGE (2011); Júnior *et al.* (2015); Belladonna *et al.* (2017); Lousada; Fernandes (2017); Barbosa; Cicerelli; Almeida (2019); Beretta (2019); Fernandes (2019). Na comparação entre diferentes MDE, quanto menores são estes valores, maior a precisão dos modelos avaliados em relação ao modelo base (VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2007).

A partir dos dados amostrados neste estudo, a análise dos valores de média, desvio padrão das altitudes obtidas indica maior acurácia do MDE UAV<sub>mdt</sub> em relação ao MDE LiDAR, quando considerada toda a malha amostral. Essa maior acurácia é evidenciada pela menor dispersão das diferenças altimétricas em torno da média amostral em comparação aos outros MDE. Ainda, o MDE UAV<sub>mdt</sub> apresentou as menores médias e desvio padrão de diferenças absolutas e reais, e a maior parte das amostras apresentou valores mais elevados em relação ao MDE LiDAR.

O RMSE também é utilizado para avaliação da acurácia de MDE por indicar com destaque os erros mais elevados dos modelos (JIMÉNEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2017; SOUZA; RAMOS; MARCATO JUNIOR, 2019), assim como as análises de correlação demonstram a proximidade entre os dados (SUN *et al.*, 2003).

Considerando os valores de RMSE, ficou evidenciada a maior qualidade do MDE UAV<sub>mdt</sub>, que apresentou valor significativamente mais baixo em relação aos demais MDE. Quando analisadas as diferenças altimétricas brutas entre os modelos, o MDE UAV<sub>mdt</sub> foi o que apresentou maior porcentagem de amostras com erro entre 0 e 1 m, corroborando aos demais resultados que apontam sua maior qualidade quando comparado aos outros MDE.

Após a classificação do uso e cobertura do solo, de maneira geral, o MDE UAV<sub>mdt</sub> também foi o que apresentou maior acurácia, quando comparado ao MDE LiDAR. A exceção se deu na classe de edificações para o MDE SRTM, que apresentou maior correlação e RMSE menor que o MDE UAV<sub>mdt</sub>. Para as demais classes, os valores de média e desvio padrão foram semelhantes para todos os MDE. Ainda, a análise dos dados evidenciou aumento gradativo dos erros altimétricos (em ordem crescente) para as classes de edificação, outros e maciço vegetal, para todos os MDE, conforme observado no mapa de diferenças altimétricas.

Além das análises metodológicas descritas anteriormente, as análises estatísticas também fornecem dados importantes sobre a acurácia de MDE oriundos de diferentes sensores. Pinheiro (2006); Costa *et al.* (2010); Neves *et al.* (2021), por exemplo, utilizaram o teste de análise de variância (ANOVA) para comparar as médias das amostras e testar a hipótese de que todas estas médias são iguais. Para detectar erros sistêmicos entre as amostras, Coelho (2015); Ferraz (2017) utilizaram o teste *t-Student*, assim como para a comparação múltipla das médias dos dados o teste *Tukey* foi utilizado por Costa *et al.* (2010); Neves *et al.* (2021).

Neste estudo, a aplicação dos testes ANOVA e análise Kruskal-Wallis demonstraram diferença estatística entre todos os MDE, quando considerada toda a área de estudos. Entretanto, quando consideradas as classes de uso e cobertura do solo separadamente, houve semelhança estatística entre alguns grupos de amostras.

Os MDE SRTM e MDE UAV<sub>mdt</sub> apresentaram semelhança de valores médios e na dispersão de dados quando incidentes na classe de edificação. Nos pontos localizados em maciço vegetal, houve diferença entre todos os valores médios de altitude dos MDE. Em relação a dispersão dos dados apenas os MDE SRTM e UAV<sub>mds</sub> apresentaram semelhança estatística significativa. Na classe outros os únicos MDE que apresentaram semelhança estatística foram o LiDAR e UAV<sub>mdt</sub> em relação aos valores médios e a dispersão de dados.

Em relação a regressão linear, a classe de edificação demonstrou maior correlação entre MDE LiDAR e MDE SRTM. Nas classes maciço vegetal e outros foi evidenciada maior correlação entre MDE LiDAR e MDE UAV<sub>mdt</sub>.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstraram a acurácia de MDE obtido com UAV quando comparado ao MDE LiDAR, evidenciando que o Modelo Digital de Terreno (MDT) apresenta menores erros que o Modelo Digital de Superfície (MDS), embora oriundo do mesmo sensor.

Quando considerada toda a área de estudos, os dados do MDE UAV<sub>mdt</sub> se aproximaram mais do MDE LiDAR, com correlação alta entre as amostras. Após a classificação do uso e cobertura do solo, o MDE SRTM apresentou correlação ligeiramente maior para a classe edificação, quando comparado ao MDE LiDAR. Ainda assim, para as classes de maço vegetal e outros, os MDE UAV apresentaram significativa correlação geral, evidenciando sua acurácia.

Podemos concluir então que: (1) os MDE oriundos de UAV possuem acurácia elevada quando comparados ao MDE LiDAR, e acurácia mais elevada quando comparados ao MDE SRTM; (2) o tipo de uso e cobertura do solo pode influenciar negativamente na qualidade dos dados oriundos de UAV, tornando-os menos precisos que MDE SRTM, por exemplo; (3) nenhum dos MDE avaliados é estatisticamente semelhante ao MDE LiDAR utilizado como modelo base para as comparações. Todavia, o MDE UAV<sub>mdt</sub> apresentou os melhores resultados entre os modelos avaliados, seguido pelo MDE UAV<sub>mds</sub> e pelo MDE SRTM.

## REFERÊNCIAS

AL-RAWABDEH, Abdulla *et al.* Using an unmanned aerial vehicle-based digital imaging system to derive a 3D point cloud for landslide scarp recognition. **Remote Sensing**, **8**, **95**, 2016.

ALI, M. Y.; HAMADA, H.; ONUMA, T. Quality assessment of digital elevation model derived from ALOS PALSAR interferometry. **EAGE/GRSG Remote Sensing Workshop**, 2012.

ALKAN, Reha Metin; KARSIDAG, Gokcen. Analysis of the accuracy of terrestrial laser scanning measurements. **FIG Working Week 2012 - Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage**, Roma, p. 16, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14166: Rede de referência cadastral municipal**. Rio de Janeiro, 1998.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 199–214, 1999.

BARBER, David; MILLS, Jon; BRYAN, Paul. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage. **Proceedings of CIPA XIX International Symposium**, v. 19, p. 619–625, 2003.

BARBOSA, Vitória R F; CICERELLI, Rejane E; ALMEIDA, Tati De. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação (MDE) do satélite ALOS. **Anais XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 3327–3330, 2019.

BARBOSA, Bruno José Bonho Link; PEREIRA, Thiago Silva. **Geração de base cartográfica para área de interesse histórico/cultural por meio de levantamento fotogramétrico adquirido com vant (RPAS)**. Porto Alegre, 2017.

BARRY, P; COAKLEY, R. Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, 2013.

BECKER, Carlos *et al.* **Classification of aerial photogrammetric 3d point clouds**, 2017.

BELLADONA, Rossano *et al.* **Metodologia para validação do MDE SRTM para sua utilização em projetos em recursos hídricos**. Florianópolis, 2017.

BERETTA, Filipe Schmitz. **Novas técnicas para mapeamento geológico em planejamento de lavra a céu aberto com sensores aerotransportados**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

BRANDALIZE, Amauri Alfredo. Perfilamento a LASER : Comparação com Métodos Fotogramétricos. **ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A.**, 2002.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasília: Presidência da República, 1984.

BRAZ, Adalto Moreira *et al.* Análise da aplicação de VANT na atualização de cadastro florestal com uso de pontos de controle. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, p. 6381–6388, 2015.

BROCHADO, Gabriel Thomé. Atenuação do efeito do desflorestamento em dados SRTM. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, p. 223–231, 2015.

BRUBACHER, João Paulo *et al.* Avaliação de bases SRTM para extração de variáveis morfométricas e de drenagem. **Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 381–393, 2012.

CHAVES, Arthur Avelar *et al.* Uso de VANTs e processamento digital de imagens para a quantificação de áreas de solo e de vegetação. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, p. 5642–5649, 2015.

COELHO, Ismael Augusto. **Avaliação da qualidade posicional de dados oriundos de VANT para mapeamento fotogramétrico aplicado em projetos rodoviários**. Porto Alegre, 2015.

COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.

CORRÊA, Iran Carlos Stalliviere. **Topografia aplicada à Engenharia Civil**. 20ª Edição. Porto Alegre: DEGED/IGEO/UFRGS, 2021.

COSTA, Carlos Alexandre Gomes *et al.* Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 41, n. 2, p. 222–230, 2010.

DEUS, Rodolfo Alexandre da Silva Gomes de *et al.* Geração de dados geocartográficos na universidade de Pernambuco - Campus Garanhuns. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, p. 5543–5551, 2017.

DO CARMO, Alcione Moreira; SOUTO, Michael Vandesteem Silva; DUARTE, Cynthia Romariz. Análise qualitativa e comparativa das variáveis morfométricas da região serrana da porção sul do maciço central do ceará geradas através dos MDE: SRTM, Aster Gdem e Topodata. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 3, p. 603–620, 2015.

EVERAERTS, J. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, p. 1187–1192, 2008.

FAGUNDES, Manuella Rodrigues Fagundes. **Geração de base cartográfica tridimensional com o uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)**. Porto Alegre, 2016.

FALLAS, J. Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. **ResearchGate**, n. July, p. 1–79, 2007.

FAN, Lei; ATKINSON, Peter M. Accuracy of Digital Elevation Models from Terrestrial Laser Scanning data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 9, p. 1923–1927, 2015.

FARR, Tom G. *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1–43, 2007.

FERNANDES, Érico Borges. **Comparação de produtos topográficos através de dados SRTM e ALOS PALSAR no estudo do relevo na bacia do Rio Mourão - Paraná**. Campo Mourão, 2019.

FERNÁNDEZ, Darcy Carolina Jiménez *et al.* Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64/5, p. 619–634, 2013.

FERNÁNDEZ, Tomás *et al.* Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques. **Remote Sensing**, v. 8, n. 837, 2016.

FERRAZ, Rodrigo da Silva. **Avaliação posicional de dados altimétricos gerados por diferentes sistemas de varredura a laser terrestre – estudo de caso**. Porto Alegre, 2017.

FRÖHLICH, C; METTENLEITER, M. Terrestrial Laser Scanning - New perspectives in 3D surveying. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8/W2, p. 7–13, 2004.

GIORDAN, Daniele *et al.* UAV: Low-cost remote sensing for high-resolution investigation of landslides. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, p. 5344–5347, 2015.

GOMES, Luciano Nardini *et al.* Precisão de plantas planialtimétricas em função do posicionamento de pontos em irradiadas de campo. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 47–54, 2006.

GOMES, Luciano Nardini; CARDOSO, Lincoln Gehring. Modelagem numérica da superfície na geração da planialtimetria segundo dados de quatro equipamentos topográficos. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 81–91, 2008.

GUASSELLI, Laurindo Antonio; SIMIONI, João Paulo Delapasse; LAURENT,

François. Mapeamento e classificação de áreas úmidas usando Topographic Wetness Index (TWI) a partir de modelos digitais de elevação, na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí - Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 639–659, 2020.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST Paleontological Statistics software package for education and data analysis**, 1999.

HSIEH, Yu Chung; CHAN, Yu Chang; HU, Jyr Ching. Digital elevation model differencing and error estimation from multiple sources: A case study from the Meiyuan Shan landslide in Taiwan. **Remote Sensing**, v. 8, n. 199, 2016.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Avaliação planialtimétrica de dados ALOS / PRISM - Estudo de caso : Itaguaí - RJ**. Rio de Janeiro, 2011.

ISIOYE, Olalekan Adekunle; JOBIN, Paul. An assessment of digital elevation models (DEMs) from different spatial data sources. **Asian Journal of Engineering, Sciences & Technology**, v. 2, n. 1, p. 1–17, 2012.

JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency. **About ALOS - Overview and Objectives**. Disponível em: [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about\\_index.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm). Acesso em: 14 abr. 2021.

JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency. **ALOS User Handbook**, 2007.

JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, Sergio Iván *et al.* Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. **Ingeniería Agrícola y Biosistemas**, v. 9, n. 2, p. 85–100, 2017.

JÚNIOR, Leomar Rufino Alves *et al.* Validação de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, p. 2157–2164, 2015.

KLEMAS, Victor V. Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 31, n. 5, p. 1260–1267, 2015.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, p. 193–203, 1998.

LINDNER, Gerald *et al.* UAV monitoring and documentation of a large landslide. **Applied Geomatics**, v. 8, p. 1–11, 2015.

LIU, Willian Tse Horng. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2. ed. Oficina de Textos, 2007.

LOUSADA, Gabriel; FERNANDES, Manoel do Couto. Avaliação da precisão vertical de modelos digitais de elevação e análise de tendência em diferentes domínios geomorfológicos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 7, p. 1263–1276, 2017.

LUCIEER, Arko; JONG, Steven M.de; TURNER, Darren. Mapping landslide displacements using structure from motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, v. 38, n. 1, p. 97–116, 2014.

LUIZ, Leandro *et al.* Avaliação da qualidade dos modelos digitais de elevação ASTER e SRTM para o estado da Bahia. p. 1797–1806, 2017.

MACÊDO, Renê Jota Arruda de; SURYA, Leandro. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno. **Revista Contexto Geográfico**, Maceió, p. 47–55, 2018.

MANOUSAKIS, J. *et al.* Comparison of UAV-enabled photogrammetry-based 3D point clouds and interpolated DSMs of sloping terrain for rockfall hazard analysis. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Atenas, v. 42, n. 2W2, p. 71–77, 2016.

MARTELLO, Maurício *et al.* Utilização de imagens aéreas obtidas por RPA no monitoramento inicial de Eucalyptus sp. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, p. 5990–5997, 2015.

MATIAS, Gustavo Roberto de Moraes; GUZZATTO, Matheus Pereira; SILVEIRA, Pablo Guilherme. **Mapeamento topográfico cadastral por integração de imagens adquiridas com VANT a técnicas tradicionais**. Porto Alegre, 2015.

MUHADI, N. A.; ABDULLAH, A. F.; KASSIM, M. S.M. Quantification of Terrestrial Laser Scanner (TLS) elevation accuracy in oil palm plantation for IFSAR improvement. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 37, 2016.

NEVES, Monique De Paula *et al.* Otimização de Modelos Digitais de Elevação para a obtenção de variáveis geomorfológicas e hidrológicas: avaliação da convolução bidimensional sobre os produtos ALOS, ASTER-GDEM e SRTM. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, p. 1–15, 2021.

NEX, Francesco; REMONDINO, Fabio. UAV for 3D mapping applications: A review. **Applied Geomatics**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2014.

NIETHAMMER, U. *et al.* Open source image-processing tools for low-cost UAV-based landslide investigations. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII, n. 1/C22, p. 161–166, 2011.



NÓBREGA, Rodrigo Affonso de Albuquerque; SANTOS, Claudomiro dos; CINTRA, Jorge Pimentel. Comparação quantitativa e qualitativa entre o Modelo Digital gerado pelo SRTM e por aerofotogrametria. *In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 2005, Goiania. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiania: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 4437–4444.

PINHEIRO, Eduardo da Silva. Comparação entre dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission, cartas topográficas e gps: numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia** n° 58/01, 2006.

PROKEŠOVÁ, Roberta; KARDOŠ, Miroslav; MEDVEĎOVÁ, Alžbeta. Landslide dynamics from high-resolution aerial photographs: A case study from the Western Carpathians, Slovakia. **Geomorphology**, v. 115, p. 90–101, 2010.

QUINTERO, Mario Santana. **3D Risk Mapping. Theory and practice on terrestrial laser scanning. Training material based on practical applications. Universidad politecnica de Valencia, Spain**, 2008.

RENNÓ, Camilo Daleles. Redução dos efeitos do desmatamento sobre modelo digital de elevação do SRTM usando imagem TM/LANDSAT. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, p. 7095–7102, 2009.

RODRIGUEZ, E *et al.* **An assessment of the SRTM topographic products**. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005.

RUIZ, Luis Fernando Chimelo *et al.* Ferramenta para classificação de nuvem de pontos cotados. **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, n. 1, p. 6381–6388, 2015.

RUIZ, Luis Fernando Chimelo. **Uma abordagem de classificação da cobertura da terra em imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado**. Porto Alegre, 2015.

SITHOLE, G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Annapolis, v. 34, p. 22–24, 2001.

SOUZA, Mauricio de; RAMOS, Ana Paula Marques; MARCATO JUNIOR, José. Analysis of the altimetric accuracy of ALOS AW3D30 digital surface model for mato grosso do sul. **Anuario do Instituto de Geociencias**, v. 42, n. 3, p. 333–338, 2019.

SUN, G. *et al.* Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 401–411, 2003.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância. **Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**, v. 4, p. 1415–1111, 2003.

TAROLLI, Paolo; MUDD, Simon M. **Remote sensing of geomorphology**. Developments in Earth Surface Processes, v. 23, 2020

TURNER, Darren; LUCIEER, Arko; JONG, Steven M de. Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). **Remote Sensing**, 7, p. 1736–1757, 2015.

UPEGUI, Erika; GOMEZ, Stiven. Monitoreo de la dinámica urbana usando datos LiDAR: Caso de estudio un sector en Bogotá - Colombia. **Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI**, 2017.

VALERIANO, Morisson. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004.

VAN ZYL, Jakob J. The shuttle radar topography mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, Pasadena, California, v. 48, n. 5–12, p. 559–565, 2001.

VEIGA, Luiz Augusto Koenig; ZANETTI, Maria Aparecida Z.; FAGGION, Pedro Luiz. **Fundamentos de Topografia**, 2007.

WEHR, Aloysius; LOHR, Uwe. Airborne laser scanning - An introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 68–82, 1999.

WEVER, Christian; LINDENBERGER, Joachim. Experiences of 10 years laser scanning. **Photogrammetric Week**, p. 125–132, 1999.