



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**ESTIMATIVA DA SEÇÃO TRANSVERSAL E DO VOLUME DE  
VOÇOROCA USANDO AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

**GABRIEL OLIVEIRA POSTIGLIONI**

Brasília, dezembro de 2020.

Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade de Tecnologia – FT  
Departamento de Engenharia Florestal - EFL

GABRIEL OLIVEIRA POSTIGLIONI

**ESTIMATIVA DA SEÇÃO TRANSVERSAL E DO VOLUME DE VOÇOROCA  
USANDO AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves.

Brasília

2020

GABRIEL OLIVEIRA POSTIGLIONI

**ESTIMATIVA DA SEÇÃO TRANSVERSAL E DO VOLUME DE VOÇOROCA  
USANDO AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Brasília, 01 de dezembro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves

---

Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

---

MSc. Renato Nassau Lôbo.

## **Agradecimentos**

Agradeço antes de tudo aos meus pais Beto e Carla que além de terem me incentivado a me dedicar aos estudos, sempre estiveram ao meu lado e acreditaram nos meus sonhos. Ao meu filho Miguel, que com o seu lindo sorriso me inspira a ser melhor cada dia. A minha irmã Natália que a todo momento acreditou no meu potencial. Agradeço em especial à minha companheira Júlia Rezende que me apoiou mais do que tudo na reta final da graduação. Além disso, agradeço aos demais familiares e sobretudo meu primo Petrônio Diego, engenheiro florestal, pelos auxílios durante a vida acadêmica e profissional.

Agradeço também aos amigos que fiz ao longo de todo o curso de Engenharia Florestal, que de alguma forma me ajudaram e apoiaram nessa etapa, especialmente minha amiga Bianca Vilela.

Agradeço aos parceiros de trabalho da Difusão Ambiental Consultoria Ltda., que sempre proporcionaram boas experiências e apoiaram esta pesquisa. Agradeço à toda a equipe da startup NONG, que em conjunto, fez muita coisa acontecer em pouco tempo na área de inovação com Drones.

Agradeço a empresa Urbanizadora Paranoazinho (UP) e sua equipe por ter disponibilizado a área de estudo e prestado todo apoio necessário para a devida realização dessa pesquisa.

Aos representantes da Banca, Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves, Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi e MSc. Renato Nassau Lôbo, pelo aceite em avaliar e contribuir com a evolução desse trabalho.

*“Insanidade é continuar fazendo sempre a  
mesma coisa e esperar resultados diferentes”  
Albert Einstein.*

## RESUMO

A expansão do emprego de RPAs (*Remotely-Piloted Aircraft*) nos múltiplos campos da engenharia florestal é realidade atual. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de produtos cartográficos digitais (PCDs) derivados de dados adquiridos com o uso de RPAs, comparados com dados de topografia convencional, com propósito de interpretar e analisar as seções transversais de uma erosão hídrica do tipo voçoroca. A voçoroca estudada está localizada na região administrativa de Sobradinho II no Distrito Federal, caracterizada por clima Tropical e solos do tipo cambissolos háplicos. Para o levantamento por RPA foi utilizado um quadróptero multirrotor com o auxílio de pontos de controle e de verificação de campo. No levantamento por Topografia Convencional foi empregado um par de receptores de sinais GNSS, que operam no método de rastreamento dos pontos do tipo *Real Time Kinematic* (RTK). A elaboração dos MDTs (Modelo Digital de Terreno) foi feita a usando os *softwares* Agisoft Metashape® e ArcMap® 10.6. Com a finalidade de avaliar a acurácia dos PCDs gerados por RPA, utilizou-se o *software* GeoPEC, que é baseado no Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Os resultados apresentados pelo GeoPEC caracterizam o PCD como classe C, em escala 1/1.000 em planimetria. Em altimetria, o PCD alcançou a classe B em curvas de nível com equidistância em dois metros, conforme a classificação do PEC. Foram projetadas 15 seções transversais para as análises estatísticas de erros de medição. A maior diferença do erro absoluto médio observado foi -1,003 metros e o menor, foi 0,190 metros, com desvio padrão de 0,31 metros. A partir dos cálculos do NSE (Coeficiente de Nash-Sutcliffe), foram observadas que sete das 15 seções analisadas tiveram resultados adequados ( $NSE > 0,5$ ) e oito seções apresentaram resultados inadequados ( $NSE < 0,5$ ). Por fim, os resultados comparativos dos volumes dos MDTs estudados, demonstraram amplitude volumétrica de 259,39 metros cúbicos. Os resultados deste estudo indicam que os PCDs elaborados a partir de dados da RPA apresentaram boa acurácia para a caracterização topográfica e a mensuração de voçorocas, apesar de haver discrepâncias planimétricas e altimétricas entre o levantamento feito usando dados de RPA e de Topografia Convencional.

**Palavras-chave:** Aerofotogrametria. Erosão Hídrica. Modelo Digital de Terreno (MDT). Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC).

## ABSTRACT

The expansion of the use of RPAs (*Remotely-Piloted Aircraft*) in the multiple fields of forest engineering is a current reality. The present study aimed to evaluate the use of digital cartographic products (PCDs) derived from data acquired with the use of RPAs, compared with data from Conventional Topography, with the purpose of interpreting and analyzing the cross sections of a gully erosion. The studied voçoroca is located in the administrative region of Sobradinho II in the Federal District, characterized by a tropical climate and soils of the Cambissolos type. For the survey by RPA, a multicopter quadcopter was used with the help of control points and field verification. In the survey by Conventional Topography, a pair of GNSS signal receivers were used, which operate in the method of tracking points of the type *Real Time Kinematic* (RTK). The elaboration of the MDTs (Digital Terrain Model) was made using the *software* Agisoft Metashape® and ArcMap® 10.6. In order to assess the accuracy of PCDs generated by RPA, the GeoPEC *software* was used, which is based on Decree nº 89.817 of June 20, 1984. The results presented by GeoPEC characterize the PCD as class C, in scale 1 / 1,000 in planimetry. In altimetry, the PCD reached class B in contour lines with an equidistance of two meters, according to the PEC classification. 15 cross sections were designed for statistical analysis of measurement errors. The biggest difference in the mean absolute error observed was -1.003 meters and the smallest was 0.190 meters, with a standard deviation of 0.31 meters. From the calculations of the NSE (Nash-Sutcliffe coefficient), it was observed that seven of the 15 sections analyzed had adequate results ( $SES > 0.5$ ) and eight sections showed inadequate results ( $SES < 0.5$ ). Finally, the comparative results of the volumes of the MDTs studied, showed a volumetric amplitude of 259.39 cubic meters. The results of this study indicate that the PCDs elaborated from RPA data presented good accuracy for the topographic characterization and the measurement of gullies, despite there being planimetric and altimetric discrepancies between the survey made using data from RPA and Conventional Topography.

**Keywords:** Aerophotogrammetry. Water erosion. Digital Terrain Model (MDT). Cartographic Accuracy Standard (PEC).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. RPA de asa fixa. Fonte: Xmobots, 2020.....	17
Figura 2. RPA multirrotor. Fonte: DJI, 2020.....	17
Figura 3: Mapeamento pelo processo fotogramétrico. Fonte: Tommaselli, 2009. .....	20
Figura 4: Superposição de imagens. Fonte: Tommaselli, 2009. ....	21
Figura 5: Representação geométrica de uma seção da fotografia em um terreno plano para cálculo da escala. Fonte: Tommaselli, 2009.....	22
Figura 6: Equações de escala na fotografia. Fonte: Tommaselli, 2009. ....	22
Figura 7: Representação geométrica de uma seção da fotografia em um terreno não plano para cálculo da escala. Fonte: Tommaselli, 2009.....	23
Figura 8: Alteração de escala em uma fotografia inclinada em perspectiva. Fonte: Tommaselli, 2009. ....	23
Figura 9: Representação esquemática de um MDT em sistema de coordenada X,Y,Z. Fonte: Namikawa <i>et al.</i> , 2003.....	24
Figura 10: Seções transversais esquemáticas dos canais de diferentes tipos de voçorocas. Fonte: Dobek et. Al, 2011. ....	28
Figura 11: Caracterização dos contornos das voçorocas. Fonte: Bigarella, 1994. .....	28
Figura 12: Adaptação da caracterização dos contornos das voçorocas. Fonte: Vieira (2008, apud CABRAL, 2018).....	29
Figura 13. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: O autor. ....	31
Figura 14. GPS GNSS NAVCOM-John Deer. Fonte: Topomap, 2020. ....	34
Figura 15. Fluxograma das etapas da metodologia do estudo. Fonte: o Autor. .....	37
Figura 16. Mapa da disposição dos pontos coletados pela topografia convencional. Fonte: O autor. ....	38
Figura 17. Mapa da Rede Triangular Irregular - TIN. Fonte: O autor.....	39
Figura 18. MDT gerado pelos dados da topografia convencional. Fonte: O autor. .....	40
Figura 19. Planejamento de voo realizado no aplicativo DroneDeploy. Fonte: Adaptado de Dronedeploy, 2020.....	41



Figura 20: Localização dos pontos de controle e verificação na área de estudo. Fonte: O autor. ....	42
Figura 21. Nuvem de pontos densa gerada pelo Agisoft Metashape. Fonte: Adaptado Agisoft Metashape, 2020. ....	43
Figura 22. Dados de entrada no software GeoPEC. Fonte: Adaptado GeoPEC, 2020. ....	44
Figura 23. Disposição das seções transversais ao longo da Voçoroca. Fonte: O autor. ....	45
Figura 24. Gráfico das discrepâncias posicionais altimétricas, gerado pelo software GeoPEC, onde d é o ponto de controle verificado. Fonte: O autor. ....	48
Figura 25. Gráficos do perfil topográfico das seções transversais. Fonte: o autor. ....	53
Figura 26. Discrepância da média dos erros absolutos para os dados RPA e Topografia Convencional. ....	55
Figura 27. Dispersão NSE em relação a linha de tendência. ....	56
Figura 28. Visualização 3d da voçoroca na área de estudo. Fonte: o autor. ...	57
Foto 1. Perfil do solo da Voçoroca. Fonte: O autor. ....	32
Foto 2. Dji Phantom 4 Pro. Fonte: O autor. ....	33
Foto 3. Ponto de controle alocado em campo. Fonte: o autor. ....	34
Foto 4. Coleta dos pontos referentes ao levantamento topográfico. Fonte: o autor. ....	38
Foto 5. Rastreo das coordenadas dos pontos de controle. Fonte: O autor. ....	42
Foto 6. Registro da predominância do capim do gênero <i>Brachiaria</i> ao longo do perímetro da Voçoroca. Fonte: O autor. ....	49
Foto 7. Visada da voçoroca referente a seção transversal 15. Fonte: O autor. .....	54
Foto 8. Equipe que participou do levantamento de campo. ....	65
Foto 9. Árvore caída em meio a Voçoroca. ....	65
Foto 10. Entulho jogado dentro da Voçoroca. ....	66
Foto 11. Visada da Voçoroca. ....	66
Foto 12. Visão aérea da Voçoroca. ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros utilizados no planejamento de voo. ....	41
Tabela 2. Resultados das estatísticas básicas para planimetria conforme PEC. .....	47
Tabela 3. Resultados das estatísticas básicas para altimetria conforme PEC. .....	47
Tabela 4. Resultados das estatísticas do erro absoluto médio das seções transversais. ....	55
Tabela 5. Resultados das estatísticas do NSE das seções transversais.....	56
Tabela 6. Valores referentes ao cálculo do volume da voçoroca estimado usando dados de RPA e de levantamento topográfico. ....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
- BEIDOU – *Beidou Navigation Satellite*
- DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo
- GALILEO – Sistema de Navegação por Satélite da União Europeia
- GCP – *Ground Control Point*
- GLONASS – *Global Orbiting Navigation Satellite System*
- GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*
- GPS – *Global Positioning System*
- GSD – *Ground Sample Distance*
- INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
- MDS – Modelo Digital de Superfície
- MDT – Modelo Digital de Terreno
- NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
- NSE - *Coefficiente de Nash-Sutcliffe*
- OACI – Organização da Aviação Civil Internacional
- PCD – Produto Cartográfico Digital
- PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal
- PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica
- PPP – Posicionamento por Ponto Preciso
- RPA – *Remotely-Piloted Aircraft* (Aeronave Remotamente Pilotada)
- RTK – Real Time Kinematic
- TIN – *Triangulated Irregular Network* (Rede Triangular Irregular)
- UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*
- VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivo Geral.....	14
1.2 Objetivo Específico.....	15
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1 Aeronave Remotamente Pilotada (RPA).....	15
2.1.2 História das RPAs.....	15
2.1.2 Tipos de RPAs.....	16
2.2 Fotogrametria.....	17
2.2.1 Definição.....	17
2.2.2 Histórico.....	18
2.2.3 Mapeamento de superfícies pela aerofotogrametria.....	19
2.2.4 Escala na fotogrametria.....	21
2.3 Modelo Digital do Terreno (MDT).....	23
2.4 <i>Global Navigation Satellite System (GNSS)</i> .....	24
2.5 Erosão Hídrica.....	25
2.5.1 Definição de Erosão Hídrica.....	25
2.5.2 Tipos de Erosão.....	26
2.5.3 Voçoroca.....	27
2.5.4 Prejuízos decorrentes da erosão hídrica.....	29
2.6 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC).....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1 Área de Estudo.....	31
3.2 Material.....	32
3.2.1 Aeronave Remotamente Pilotada.....	32
3.2.2 Receptor de sinais GNSS.....	33
3.2.3 Pontos de controle e verificação.....	34
3.2.4 <i>Softwares</i> .....	35
3.2.4.1 DroneDeploy.....	35
3.2.4.2 Agisoft Metashape.....	35
3.2.4.3 ArcMap.....	35

3.2.4.4 GeoPEC.....	35
3.2.4.5 Microsoft Excel .....	36
3.3 Métodos .....	36
3.3.1 Levantamento topográfico .....	37
3.3.2 Planejamento de Voo .....	40
3.3.3 Distribuição de pontos de controle e verificação .....	41
3.3.4 Processamento de Imagens .....	42
3.3.5 Verificação da Acurácia.....	43
3.3.6 Seções Transversais .....	44
3.3.7 Análise estatística.....	45
3.3.8 Volume.....	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>58</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>
<b>7. APÊNDICE A: RELATÓRIO FOTOGRÁFICO .....</b>	<b>65</b>
<b>8. APÊNDICE B: RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO AEROLEVANTAMENTO REALIZADO EM 11 /08/2020.....</b>	<b>68</b>

.....

## 1. INTRODUÇÃO

As aeronaves remotamente pilotadas (do inglês: “*Remotely-Piloted Aircraft*” – RPA), são popularmente conhecidas como Drones (tradução do Inglês, “zangão”), são frequentemente utilizadas para diversas aplicações no momento presente. As tecnologias que englobam a ciência por trás dessas aeronaves tem se desenvolvido rapidamente nos últimos anos, viabilizando seu uso nos múltiplos campos da engenharia florestal, tais como: avaliação e monitoramento de impactos ambientais (LONGHITANO, 2010); auditoria ambiental (ROBERTO, 2013); cadastro ambiental rural (DA SILVA; BOTELHO, 2017); controle e qualidade de plantios clonais de Eucalipto (PAEZ, 2011); estimativa do volume de madeira em pátio de estocagem de toras (FIGUEIREDO *et al.*, 2016), inventários florestais (SOARES *et al.*, 2015); mapeamento de voçorocas (DA SILVA; VIEIRA, 2020), dentre outros.

A evolução tecnológica alcançou também os *softwares* e aplicativos de planejamento de voos automatizados, tais como Pix4d, GSPRO e DroneDeploy, e de processamento de imagens, a exemplo do Agisoft Metashape. O benefício dessa tecnologia auxilia na aplicação de RPAs em projetos voltados para a geração de produtos cartográficos. Essas aeronaves têm capacidade de mapeamento tanto de pequenas áreas, quanto de grandes áreas e, também, permitem a aquisição abundante de dados e de informações com resultados excepcionais e com maior custo-benefício, ou seja, menos dispendiosos do que aqueles obtidos pelas demais ferramentas, como exemplo, os satélites e as plataformas aéreas convencionais para o sensoriamento remoto (WHITEHEAD *et al.*, 2014).

A aerofotogrametria, segundo Tommaselli (1999), consiste na obtenção de fotografias do terreno por meio de câmaras de precisão, que são embarcadas em um veículo aéreo, que compreende uma ramificação da ciência conhecida como fotogrametria. A aplicação dessa abordagem apresenta uma série de vantagens perante a sua utilização, tais como: ágil obtenção de dados, dispensável necessidade de tocar diretamente o objeto medido, possibilidade de mensurar os fotogramas a qualquer instante quando desejado e ainda a ampliação da precisão, conforme a relevância do projeto (TOMMASELLI, 2009).

A evolução tecnológica possibilitou a automação de todos os estágios de construção dos principais produtos cartográficos, os quais podem ser elaborados a partir do processamento de imagens obtidas por RPAs, sendo esses itens: os ortomosaicos georreferenciados e os modelos digitais de superfície e de terreno (MDS e MDT, respectivamente). Os *softwares* e aplicativos utilizados nesse processo apresentam muitas configurações, as quais propiciam a

personalização dos resultados, que possibilitam realizar diversas análises e indicar as características de interesse das áreas representadas.

Essa tecnologia apresenta-se como uma alternativa viável ao monitoramento e à caracterização da dinâmica de erosões hídricas a partir de produtos cartográficos por ela gerados. Como definição, tem-se que a erosão hídrica é um processo gerado pela desagregação das partículas elementares dos solos, sendo fruto do choque das gotas de chuva sobre esses, por meio do influxo da precipitação e do escoamento da água, promovendo, assim, o transporte final desses fragmentos para o leito de um rio (LIMA, 2010). Esse fenômeno é capaz de causar severos danos ambientais, como a poluição das águas e até o assoreamento de corpos hídricos, o que faz com que a erosão seja considerada a maneira mais danosa de degradação do solo (COGO, LEVIEN, SCHWARZ., 2003). Tais erosões hídricas podem ser classificadas de acordo com a sua decorrência e são divididas em: erosão laminar, ravina, sulco e voçoroca.

A forma mais comum para realizar essas análises é por meio da topografia convencional, que se utiliza de equipamentos topográficos como o receptor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de precisão, operando o método *Real Time Kinematic* (RTK). Nessa metodologia os dados são coletados *in loco*, demandam grande esforço operacional e gastam tempo elevado para serem levantados.

No Brasil, a fim de verificar a qualidade posicional dos produtos cartográficos, foi editado o Decreto-Lei N° 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece as normas a serem observadas por todas as entidades públicas e privadas produtoras e usuárias de serviços cartográficos. Esse regulamento trata da denominação de Instruções Reguladoras de Normas Técnicas da Cartografia Nacional, através de procedimentos e padrões a serem obedecidos no desenvolvimento de documentos cartográficos, criando o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), e uma classificação das cartas em: Classe A, B e C.

Dessa forma, é necessária a realização de estudos comparativos de métodos desenvolvidos e testados com metodologias modernas ainda em construção e aprimoramento, a fim de serem avaliadas as vantagens e as desvantagens de cada metodologia. A presente pesquisa foi desenvolvida nesse sentido, e com propósito de ponderar acerca das novas e das convencionais tecnologias empregadas na caracterização e mensuração de voçorocas.

## **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho incluiu a análise de produtos cartográficos digitais (PCDs) adquiridos utilizando as RPAs, com o objetivo de analisar seções transversais de erosão hídrica do tipo

voçoroca em área urbana localizada em Sobradinho, Distrito Federal, explorando potencialidades na produção de resultados com relevância ao estudo de erosões hídricas.

## **1.2 Objetivo Específico**

- Gerar Modelos Digitais do Terreno (MDT) a partir de imagens capturadas por RPA e pontos da Topografia Convencional;
- Analisar a qualidade dos produtos cartográficos digitais elaborados com os dados da RPA;
- Criar e comparar seções transversais ao longo da Voçoroca;
- Calcular o volume da Voçoroca da área de estudo;

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Aeronave Remotamente Pilotada (RPA)**

#### **2.1.2 História das RPAs**

A nomenclatura Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) foi ratificada pela Agência Nacional de Aviação Civil. (ANAC) e pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), segundo as orientações da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI). Tais RPAs dispõem de um conjunto de sistemas, que compreendem além das aeronaves propriamente ditas. Essas aeronaves possuem uma Estação de Pilotagem Remota, integrada por um Comando e Controle. Ainda é comum ser embarcada às RPAs itens acessórios, tais como câmeras digitais, sensores infravermelhos, sensores multiespectrais, sensores hiperespectrais, sensores laser como o LIDAR (*Light Detection and Ranging*), entre outros elementos que podem ser adicionados à aeronave de acordo com a operação pretendida.

No Brasil, as RPAs ainda são popularmente conhecidas como Drones (do inglês, Zangão, termo muito utilizado pelos órgãos de imprensa nacional) e como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), nomenclatura proveniente da tradução do termo em inglês Unmanned Aerial Vehicle (UAV). No entanto, conforme a Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA nº 100-40, de 2020), essas duas designações populares são consideradas obsoletas pela comunidade aeronáutica internacional. Segundo o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E nº 94, de 2017), as RPAs só podem ser utilizadas para fins não recreativos, visto que para essa finalidade tem-se a definição de Aeromodelo, qual seja toda aeronave não tripulada com finalidade de lazer.

Arquivos antigos evidenciam que as primeiras utilizações documentadas de VANTs ocorreram por meio de balões e pipas. Há registros que narram que os austríacos teriam enviado



cerca de 200 balões não-tripulados, carregando bombas temporizadas para atingir a cidade de Veneza na Itália (região que na época era dominada pela Áustria), em 22 de agosto de 1849 (ALVES NETO, 2008; LONGHITANO, 2010). A história dos VANTs para propósito de Sensoriamento Remoto é relatada há muitos anos, mesmo antes dos voos tripulados. A primeira foto aérea foi produzida em 1858 pelo francês Gaspard Tournachon, a partir de um balão cativo tripulado em Paris (EISENBEISS, 2009). Nesse cenário, em 1888, Arthur Batut, na França, acoplou uma câmera fotográfica em uma pipa ou papagaios e foi considerada um avanço nas técnicas das primeiras aerofotogrametrias por VANT. Diante disso, Batut publicou em 1890 um dos primeiros livros desse tema, intitulado “A fotografia aérea por pipas” (LONGHITANO, 2010).

Essa tecnologia prosseguiu desenvolvendo-se a imensos passos. No início do século XX, foram vistos os primeiros veículos não tripulados de asa fixa com finalidades militares, a exemplo do Ketterin Bug de 1917 para transportar bombas (ROBERTO, 2013). Já em 1979, Przybilla e Wester-Ebbinghaus realizaram os primeiros experimentos em fotogrametria com VANTs de asa fixa controlados manualmente da empresa Hegi. Entretanto, essa aplicação foi limitada diante da necessidade de uma pequena pista de pouso e decolagem. Ademais, as conclusões não foram eficazes devido à velocidade e à vibração do motor do VANT de asa fixa, que ocasionaram um movimento da imagem registrada (EISENBEISS, 2009). Essa técnica consistia na adaptação de câmeras fotográficas de pequeno formato em aeromodelos controlados por rádio, o que permitiu a utilização para fins civis. Perante o progresso de tal tecnologia, emergem novos sistemas de VANTs, principalmente, pela associação dos Sistemas GPS. No início do século XXI, mais especificamente no período entre 2004 a 2007, foram elaborados projetos a partir de VANTs com asas rotativas, por exemplo o Copeter 1B da empresa Surveycopter, reconhecido por sua capacidade de efetuar um voo de forma autônoma e precisa, seguindo um planejamento de percurso determinado (ROBERTO, 2013).

### **2.1.2 Tipos de RPAs**

Existem vários tipos de classificação de Aeronaves Remotamente Pilotadas. A primeira delas foi feita de acordo com o tipo de asa, podendo ser: asa fixa, hélice rotativa (multirotor) e híbridos (LOPES, 2019). Os VANTs de asa fixa são RPAs que apresentam asas com geometrias fixas durante todo o voo, sendo que seu uso pode apresentar grandes vantagens como maior velocidade durante o voo, cobertura de maiores áreas, baixo consumo de bateria e maior aptidão para carregar equipamentos (RENNER *et al.*, 2020). No entanto, essa aeronave não dispõe de uma capacidade de grande multifuncionalidade, uma vez que elas são desenvolvidas para ter o

melhor desempenho em uma fase mais relevante do voo (DE SOUSA, 2014). Já os VANTs de hélice rotativa, ou também conhecidos como multirotores, apresentam sua sustentação nas próprias asas. Dessa forma, sua força de sustentação é dividida em múltiplos rotores de mesma potência para que, então, os torques das reações se cancelem entre si. Com isso, os multirotores dispõem de seis graus de liberdade, sendo três de translação e três de rotação ao longo dos eixos X, Y e Z (CARVALHEDO; SIQUEIRA, 2013).



Figura 1. RPA de asa fixa. Fonte: Xmobots, 2020.



Figura 2. RPA multirotor. Fonte: DJI, 2020.

Além disso, a outra classificação foi determinada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), por meio do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94, de 2017, seguindo o critério conforme o Peso Máximo de Decolagem (PMD) da RPA. Desse modo, é categorizado nas seguintes classes: Classe 1 (RPA com peso máximo de decolagem maior que 150 kg), Classe 2 (RPA com peso máximo de decolagem maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg) e Classe 3 (RPA com peso máximo de decolagem menor ou igual a 25 kg).

## 2.2 Fotogrametria

### 2.2.1 Definição

A fotogrametria tem sua definição até a década de 1960 proposta pela Sociedade Americana de Fotogrametria (*American Society of Photogrammetry*), como sendo: “Ciência e arte de obter medidas confiáveis por meio de fotografias”. Diante do progresso de novos sensores fotográficos, em 1979, a mesma Sociedade Americana de Fotogrametria atualizou o

conceito para: “Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes” (TOMMASELLI, 2009).

No decorrer da evolução dessa ciência, arte e tecnologia, pode-se observar que tal definição ainda abrange duas áreas distintas: a fotogrametria e a fotointerpretação. A fotogrametria, em seu sentido métrico restrito, aborda os métodos de obtenção de dados quantitativos, tais como coordenadas, áreas, entre outros com os quais podem ser produzidos produtos cartográficos. Já a fotointerpretação constitui-se da obtenção de dados qualitativos, analisando as fotografias e imagens de satélite, sendo essa uma área do Sensoriamento Remoto (TOMMASELLI, 2009).

O desenvolvimento tecnológico possibilitou que a fotogrametria se singularizasse em vários tipos, por exemplo analítica, analógica, digital, terrestre, espacial e aérea. Assim, a fotogrametria aérea é também chamada de Aerofotogrametria, na qual são tiradas fotografias do terreno por meio de uma câmara de precisão embarcada em uma aeronave. Além disso, existe outro subtipo de fotogrametria, que é nomeada Estereofotogrametria, e consiste em pares de fotografias que podem ser observados, medidos e interpretados através de um instrumento estereoscópico, viabilizando uma vista tridimensional do terreno (TOMMASELLI, 2009).

### **2.2.2 Histórico**

A tecnologia por trás da arte, ciência e tecnologia da fotogrametria remete a épocas anteriores ao invento da fotografia. Considera-se que o filósofo Aristóteles, em 350 a.C, já relatava como projetar imagens pelo meio ótico. Ademais, o pintor Leonardo da Vinci, em 1492, solidificou por meio de gráficos os princípios da aerodinâmica e da projeção ótica. Logo após, em 1525, o alemão Albrecht Dürer elaborou mecanismos de desenhos estereoscópicos que serviram como molde para as leis da perspectiva verdadeira. Já por volta do ano 1600, o astrônomo alemão Johannes Kepler enunciou o conceito preciso para estereoscopia. Tal definição foi usada pela primeira vez somente em 1726, pelo suíço F. Kapeller, em um levantamento prático para elaboração de cartas topográficas (TOMMASELLI, 2009).

No entanto, a prática da fotogrametria propriamente dita só pôde ser aprimorada após a invenção da fotografia em si. Isso aconteceu por volta de 1839, quando Louis Daguerre proclamou a concepção do processo fotográfico fundamentado a partir de placas de metal com uma camada de iodeto de prata, que é sensibilizado pela luz. Um ano após isso, o geodesta

francês Arago comprovou a possibilidade do uso de fotografias no levantamento topográfico (TOMMASELLI, 2009).

Alicerçado a esse desenvolvimento da fotogrametria, nota-se que a invenção do avião possibilitou ainda um enorme progresso nessa área, que, à época, estava limitada à fotogrametria terrestre. Com isso, em 1913, o avião foi empregado para obtenção de fotografias aéreas pela primeira vez com a finalidade de mapear. Nesse cenário, durante a I e a II Guerra Mundial essas aerofotos foram marcadamente aplicadas, principalmente, para fins de reconhecimento, de inteligência e de planejamento. Já no período entre as Grandes Guerras, a subdivisão da Aerofotogrametria desenvolveu-se rapidamente, tornando-se uma tecnologia, mesmo que ainda analítica e analógica, amplamente utilizada na confecção de mapas e produtos cartográficos (TOMMASELLI, 2009).

No momento presente, a Fotogrametria Digital está cada vez mais se sobrepondo à analógica e à analítica. Assim sendo, as máquinas, conhecidas como “estações de trabalho” substituem a atividade dos restituidores, com a enorme vantagem de realizar várias tarefas de forma automática e sincronizada, tais como a coleta de Modelos Digitais do Terreno (MDTs) e a produção de ortoimagens. No entanto, a automação completa no processo de restituição, como a identificação e extração automática de feições, ainda aguarda os progressos da inteligência artificial (TOMMASELLI, 2009).

### **2.2.3 Mapeamento de superfícies pela aerofotogrametria**

O fluxograma abaixo (Figura 3) aborda de maneira geral os processos a serem realizados para a produção de um mapeamento, seja ele sistemático ou para algum projeto específico.

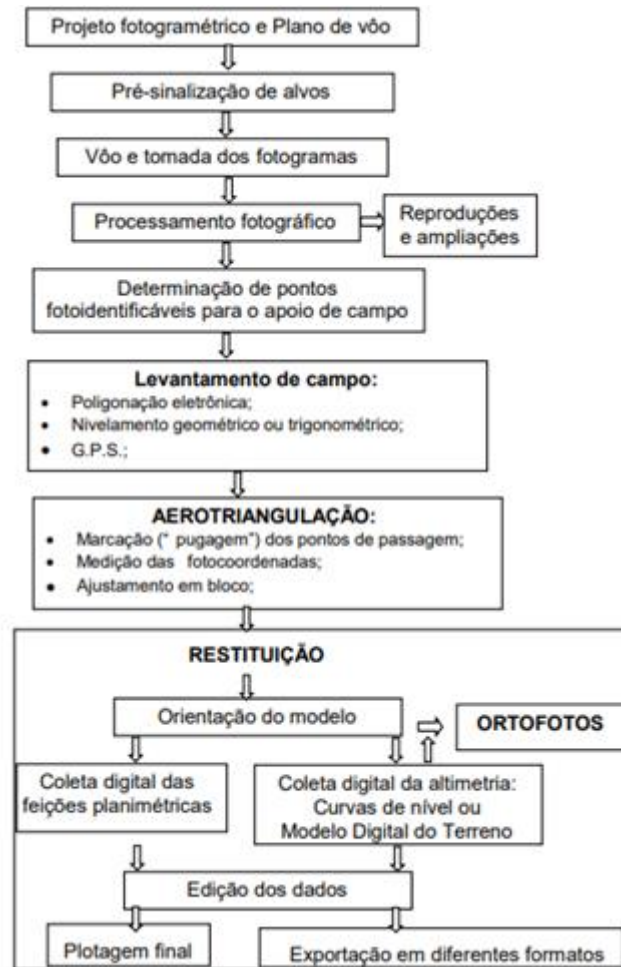


Figura 3: Mapeamento pelo processo fotogramétrico. Fonte: Tommaselli, 2009.

Na etapa de processamento fotográfico, ocorre a sobreposição de fotografias, sabendo que em uma dada linha de voo que cobre uma área específica, cada foto se superpõe às fotos anteriores em cerca de 60%. Essa superposição é designada de superposição longitudinal e ocorre seguindo o perfil esquemático mostrado a seguir (Figura 4). Além disso, observa-se que essa superposição apresenta três finalidades básicas: produção de estereopares (cobertura do terreno de dois pontos de vista distintos para observação e medição estereoscópica), elaboração de mosaicos (utilizando da porção central de cada foto, reduzindo o deslocamento devido ao relevo e as distorções) e, por fim, geração de pontos de apoio (aerotriangulação) (TOMMASELLI, 2009).

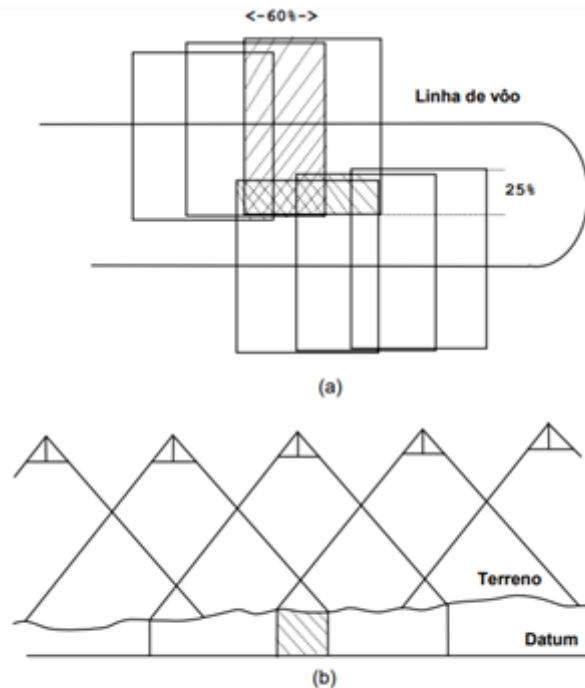


Figura 1.3 Superposição entre fotografias:

- (a) vista superior de duas faixas mostrando a superposição longitudinal e a superposição lateral;  
 (b) Perfil esquemático mostrando a cobertura longitudinal de cada fotograma.

Figura 4: Superposição de imagens. Fonte: Tommaselli, 2009.

## 2.2.4 Escala na fotogrametria

O conceito básico de escala é atribuído pela razão entre uma distância medida em um mapa ou desenho e a distância correspondente no terreno. Ou seja, se 5 cm no mapa representam 500 m no terreno, deve-se colocar as duas medidas na mesma unidade de medida, em centímetros, tendo assim o resultado da escala de 5:50.000 ou 1:10.000.

O mapa apresenta uma escala uniforme, o que significa que todos os pontos cartográficos estão nas suas posições horizontais verdadeiras, visto que essa é uma projeção ortográfica da superfície do terreno. No entanto, na fotografia isso não ocorre, uma vez que ela representa uma projeção perspectiva, em que as áreas mais próximas da câmara serão observadas maiores na fotografia do que àquelas que estão mais distantes, que serão vistas menores (TOMMASELLI, 2009).

A Figura 5 a seguir demonstra como pode ser calculada a escala em fotografias. Nessa figura observa-se uma seção de uma fotografia aérea vertical, a escala será dada pela relação dos triângulos semelhantes entre as distâncias  $ab/AB$ . Além disso, pode-se calcular a escala para uma altitude  $h$ , através da relação entre a distância focal e a altitude de voo, conforme Figura 6 (TOMMASELLI, 2009).

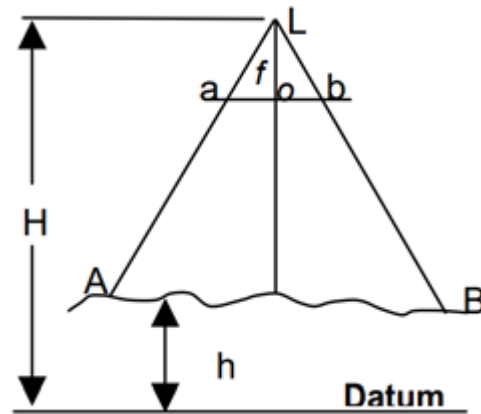


Figura 5: Representação geométrica de uma seção da fotografia em um terreno plano para cálculo da escala. Fonte: Tommaselli, 2009.

L: Centro perspectivo da câmara (lentes) – estação da câmara.

H: Altitude de voo – altitude da câmara sobre o datum vertical.

h: Altitude do terreno considerado plano – em relação ao datum.

O: Ponto principal da fotografia.

Lo: Distância focal (f) – da foto até as lentes.

ab: Distância entre os pontos do limite do campo de visão no ponto principal da fotografia.

AB: Distância entre os pontos do limite do campo de visão em relação a altitude do terreno.

$$ab/AB = f/(H-h)$$

$$E_h = f / (H-h)$$

Figura 6: Equações de escala na fotografia. Fonte: Tommaselli, 2009.

E<sub>h</sub>: Escala para a altitude h.

f: Distância focal.

H: Altitude do voo.

h: Altitude do terreno.

Na Figura 7 a seguir, é apresentada uma seção da fotografia, em que o terreno não é plano, assim, calcula-se E<sub>h</sub> para cada ponto de interesse.

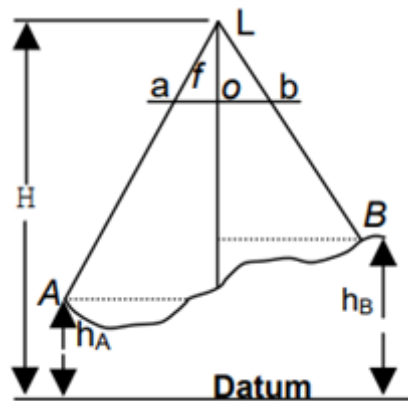


Figura 7: Representação geométrica de uma seção da fotografia em um terreno não plano para cálculo da escala. Fonte: Tommaselli, 2009.

Acerca desses cálculos, algumas observações podem ser constatadas, tais como: a escala é uma relação da distância focal e da altura de voo, podendo variar devido a altitude do terreno. Além disso, a escala pode ser reduzida ou aumentada, fixando a altura de voo, a qual é dada pelo valor aproximado do espaço entre o plano médio do terreno até a estação da câmara, e alterando a distância focal da câmara para mais ou para menos (TOMMASELLI, 2009).

Diante disso, é observado o conceito de deslocamento devido ao relevo, o qual apresenta-se como consequência da projeção perspectiva da fotografia, sendo representado pela inclinação aparente dos objetos relativamente ao centro da foto. Portanto, a escala também pode ser modificada pela inclinação da fotografia, caso essa não seja perfeitamente vertical, como observada na Figura 8 (TOMMASELLI, 2009).

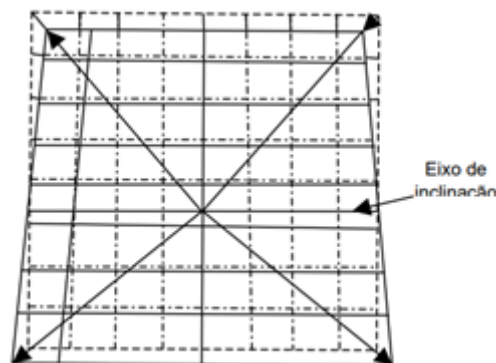


Figura 8: Alteração de escala em uma fotografia inclinada em perspectiva. Fonte: Tommaselli, 2009.

### 2.3 Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma modelagem matemática computacional da disposição de um fenômeno espacial que acontece no interior de uma região da superfície terrestre. Nesse sentido, conclui-se que o MDT pode carregar abundantes informações



representadas, tais como: dados do relevo, dados geológicos, levantamentos de profundidades, informações meteorológicas, dados geofísicos e geoquímicos (NAMIKAWA *et al.*, 2003).

O MDT também pode ser designado de Modelo Digital de Elevações (MDE), constituído de vetores de números, os quais simbolizam a distribuição espacial de elevações, representando, assim, as elevações de pontos em uma área cartográfica digital (MONDARDO, 2007).

Esses vetores se apresentam de forma espacial sobre a superfícies, sendo elaborados por meio de eixos de coordenadas (X,Y,Z), onde o valor atribuído ao fenômeno espacial em questão será dado pelo eixo Z, conforme a Figura 9 abaixo (NAMIKAWA *et al.*, 2003).

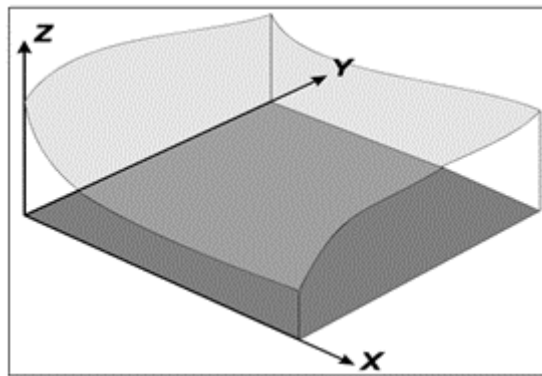


Figura 9: Representação esquemática de um MDT em sistema de coordenada X,Y,Z. Fonte: Namikawa *et al.*, 2003.

Os produtos cartográficos digitais, como o MDT, podem ser amplamente trabalhados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a fim de produzir diversas análises minuciosas, por exemplo: geração de curvas de nível, perfil topográfico e declividade do terreno.

#### **2.4 Global Navigation Satellite System (GNSS)**

O Global Navigation Satellite System (GNSS) é traduzido como um sistema global de navegação por satélite. O termo foi salientado na década de 1990, segundo Krueger (2011 apud SANTOS, 2016). Esse sistema teve sua gênese no começo da década de 1950 a partir do lançamento de satélites na órbita terrestre e, desde então, foi iniciado o uso desses para o posicionamento geodésico (SANTOS, 2016). No princípio, o sistema Transit foi utilizado, conforme Monico (2008 apud POLEZEL, 2010), que se embasava em medidas Doppler, porém esse sistema apresentava uma precisão muito pequena, em virtude de baixas órbitas e baixas quantidades de satélites. No momento presente, o sistema GNSS abarca vários outros sistemas de posicionamento, tais como Global Positioning System (GPS), sistema americano que surgiu a fim de resolver o entrave da pequena quantidade de satélites, GLONASS (sistema russo),

GALILEO (sistema da união europeia), Beidou (sistema chinês), dentre outros (POLEZEL, 2010).

Os sistemas de posicionamentos acima obtém pontos de maneira primária em um sistema cartesiano global geocêntrico (X,Y,Z), que não são exatamente utilizadas para a topografia. Assim, esses pontos são transformados em coordenadas geodésicas ou UTM. Além disso, a fim de efetivar a associação do GPS e da Topografia, subsequentemente, converte-se as coordenadas dos pontos da poligonal obtidos por GPS para um Sistema Topográfico Local, com o propósito de compatibilizar com as medições terrestres de angulação e distâncias horizontais (DE AZAMBUJA, MATSUOKA, 2007).

Nesse sentido, de acordo com Monico (2008 apud VIANA, 2017), há cinco tipos de posicionamento GNSS pelo método relativo: o estático (é o posicionamento que não ocorre com a presença de movimentos), estático rápido, semi-cinemático, o cinemático (que acontece quando há movimentos) e o cinemático em tempo real.

Dessa forma, há a necessidade de corrigir as coordenadas coletados pelo GNSS em tempo real, devido ao posicionamento relativo cinemático em tempo real, por meio do método RTK (do inglês: “*Real Time Kinematic*”). Esse método faz uso de dados obtidos em pontos de referência, os quais são transmitidos para um receptor móvel, podendo ser via rádio e internet, com o objetivo de possibilitar correções dos valores e observações dos pontos precisos instantaneamente (DOS SANTOS, 2016).

## **2.5 Erosão Hídrica**

### **2.5.1 Definição de Erosão Hídrica**

Erosão hídrica é a designação dada ao processo que ocorre com o solo, conforme Lima (2010), essa ocorre devido ao desagregamento das partículas que compõem o solo, a partir da ação da precipitação e do escoamento da água sobre o solo até que, por fim, esses fragmentos sejam depositados na jusante dos rios, onde podem ainda sofrer novas erosões.

É possível constatar que a erosão hídrica decorrente do choque das chuvas sobre as propriedades físicas do solo, gerando um grande impacto no meio ambiente e transcorre em quatro estágios.

Primeiramente, concentra-se a água da chuva em escoamento, ocorrendo a formação de um canal. Em seguida, ocorre um acréscimo rápido na profundidade e na largura desse canal, no sentido da cabeceira até a montante. Após isso, inicia-se o desenvolvimento da vegetação natural do local com a diminuição do incremento no canal e, por último, pode ocorrer eventual

estabilidade do canal em um local que há um caráter de equilíbrio com paredes estáveis e vegetação desenvolvida, a qual resguarda o solo (MAGALHÃES, 2001).

Diante disso, é possível concluir que a erosão hídrica depende de algumas variáveis, tais como: intensidade de chuvas, energia cinética da gota de chuva sobre o solo, tipos de solos, quantidade de cobertura vegetal, taxa de infiltração e escoamento, declividade e comprimento da encosta da área em que se pode observar erosões. Analisando uma dessas variáveis, observa-se que a cobertura vegetal do local pode dissipar a energia cinética da gota de chuva, fazendo com que aumente a infiltração da água no solo e diminua o escoamento superficial, logo reduzindo, por fim, a erosão hídrica (SANTOS, GRIEBELER, OLIVEIRA, 2010).

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1994), a chuva é o fator de maior relevância para ocorrência da erosão, visto que ela depende do volume e da velocidade de escoamento superficial. O intervalo de ocorrência de precipitação também é um agente que interfere nas perdas de solo, ou seja, se a frequência entre as chuvas for pequena, o volume de água no solo é alto no momento em que ocorre uma segunda precipitação e, dessa forma, o volume de escoamento também será maior. Esse conceito é chamado de Erosividade das chuvas (BERTOLINI; NETO, 1994).

Existem algumas características do solo e do local que podem favorecer a erosão hídrica, como exemplo: o tipo de solo e o tipo de relevo. Nesse sentido, observa-se que solos com granulação fina, secos, ácidos, pouco coesos e porosos estão propensos a sofrer mais erosões, sendo esses os solos arenosos. Em contrapartida, o relevo também pode determinar essa tendência, assim, tem-se que terrenos levemente ondulados e acidentados podem contribuir para formação de erosões, visto que o comprimento e a forma das vertentes influenciam muito na velocidade de formação e de desenvolvimento (MAGALHÃES, 2001).

### **2.5.2 Tipos de Erosão**

De acordo com a caracterização feita por Carvalho *et al.* (2001), a erosão hídrica pode ser classificada da seguinte forma: laminar, sulcos, ravinas e voçorocas. Esses subtipos se inter-relacionam, uma vez que seguem o desenvolvimento cronológico da erosão.

A erosão laminar é o estágio inicial da erosão, a qual corresponde à ação das gotas de chuva, do escoamento superficial e de fluidos agressivos. Essa erosão laminar é definida pela remoção de uma fina camada do solo, que pode ocorrer de maneira aproximadamente uniforme pela chuva e pelo escoamento superficial generalizada e não canalizada ainda. Tal tipo de erosão, normalmente, não é visível e pode progredir durante anos, sendo observada somente

por meio do empobrecimento do solo ou pelo assoreamento das áreas à jusante (CARVALHO *et al.*, 2001).

Em seguida a esse processo erosivo observa-se a erosão em sulcos, que é o estágio em que a erosão se dá em campos inclinados, formando numerosos canais aleatórios com poucos centímetros de profundidade. Esse subtipo de erosão é comum de ocorrer em solos cultivados recentemente (CARVALHO *et al.*, 2001).

De acordo com Magalhães (2001), a ravina, em terceiro estágio, diz respeito ao canal de escoamento da precipitação concentrado, pode ser caracterizado por feições erosivas bem delineadas. Diferentemente da erosão laminar, essa erosão em ravinas se aprofunda a cada ano até que o canal erosivo atinja até alguns metros de profundidade (MAGALHÃES, 2001).

O último subtipo e estágio definido da erosão hídrica, é a chamada voçoroca, que consiste na progressão dos canais erosivos pela concentração do fluxo superficial. Dessa maneira, é considerada a etapa mais avançada da erosão hídrica pela progressão do processo de ravinamento, podendo até atingir o lençol freático, com o aparecimento de minas d'água (MAGALHÃES, 2001).

### **2.5.3 Voçoroca**

As voçorocas podem assumir diversas formas, tais como na Figura 10. Na figura abaixo estão representados cinco subtipos distintos de seções transversais são caracterizados, os quais decorrem ao longo da direção de escoamento da água no interior da voçoroca. Esses subtipos são: as linhas de cursos naturais das voçorocas apresentadas em 1; dentro desse subtipo tem o alcance superior (em 1a), o alcance médio (em 1b) e o alcance inferior (em 1c); as linhas de escoamento das voçorocas (2); as linhas de escoamento das quedas d'água (3); as linhas de inclinação em V (4) e a seção com trajeto arborizado na área da erosão (5) (DOBEK *et al.*, 2011).

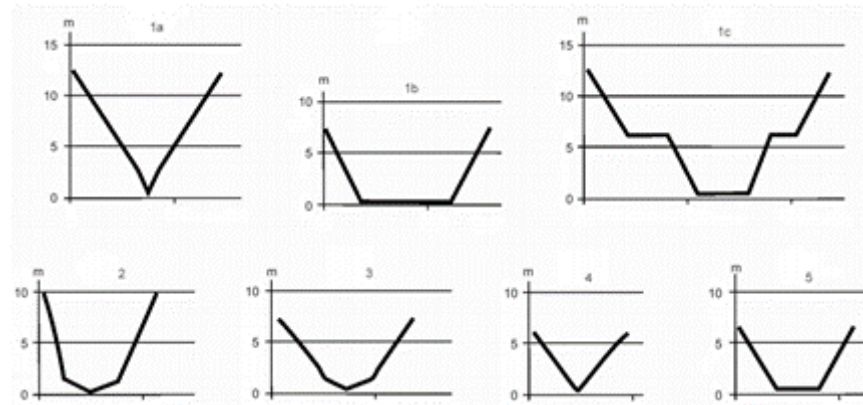


Figura 10: Seções transversais esquemáticas dos canais de diferentes tipos de voçorocas. Fonte: Dobek et. Al, 2011.

Além disso, é possível também classificar as voçorocas, conforme Bigarella (1994, apud CABRAL, 2018). Essa caracterização pode ser feita pelos seguintes contornos: linear, bulbiforme, dendrítica, em treliça, paralela e composta, como exemplifica a Figura 11 abaixo.

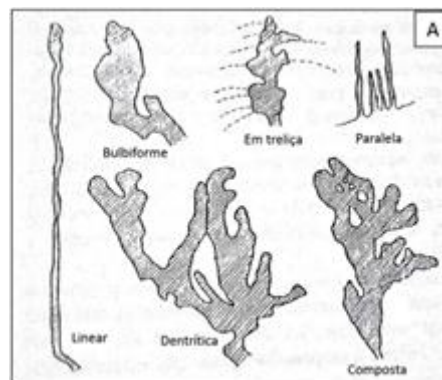


Figura 11: Caracterização dos contornos das voçorocas. Fonte: Bigarella, 1994.

No mesmo sentido que a classificação acima, Vieira (2008, apud CABRAL, 2018) apresenta uma adaptação para uma nova caracterização das voçorocas em Manaus. De acordo com o referido autor, existem os seguintes contornos da Figura 12 abaixo: linear, bifurcada, ramificada, irregular e retangular.

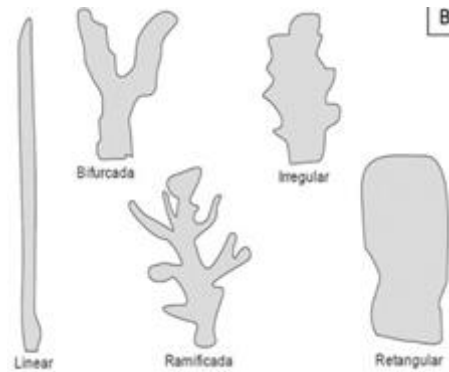


Figura 12: Adaptação da caracterização dos contornos das voçorocas. Fonte: Vieira (2008, apud CABRAL, 2018).

#### 2.5.4 Prejuízos decorrentes da erosão hídrica

Como já anunciado anteriormente, a erosão hídrica apresenta grande potencial de causar prejuízos sociais e ambientais. Entre esses prejuízos pode-se destacar a redução da capacidade produtiva dos solos pela lixiviação, o qual perde nutrientes, materiais orgânicos e defensivos agrícola. Esses prejuízos podem ainda representar o aumento dos custos de produção agrícola, a diminuição dos lucros gerados para os produtores e a conseqüente diminuição da área possível para a exploração agrícola. Além disso, pode gerar prejuízos de educação e saúde, visto que impede o acesso dos moradores dessas áreas rurais, interferindo na qualidade das vias de deslocamento (ZONTA *et al.*, 2012).

Ademais, existe ainda outro entrave gerado pela erosão hídrica, que se relaciona com o mantimento da água da chuva na propriedade, uma vez que a maior parte da água precipitada sofre escoamento superficial, não ocorrendo infiltração da água no solo. Assim, verifica-se a diminuição do volume de água que atinge e abastece o lençol freático e essa redução de água, decresce também o volume de água disponível para irrigação, além daquele utilizado para o abastecimento dos rios, lagos e poços (ZONTA *et al.*, 2012).

#### 2.6 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) foi determinado, no Brasil, por meio do Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. A deliberação trata acerca das instruções que regulamentam as normas técnicas da cartografia nacional. O artigo 2º aborda a definição dos procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de regras da cartografia, além de adotar padrões mínimos na idealização das atividades cartográficas.

Em geral, as normas técnicas estabelecidas pelo Decreto nº 89.817 são separadas de acordo com algumas características dos produtos cartográficos, tais como: a finalidade,

podendo ser cartas gerais, náuticas, temáticas, especiais, entre outras e a natureza, seja essa norma de padronização, terminologia, simbologia, procedimento, dentre outras.

O PEC é definido a partir do capítulo II do Decreto em questão, que determina alguns critérios, e leva a concluir que esse é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, definindo a exatidão dos produtos cartográficos. Essa probabilidade de 90% equivale a 1,6449 vezes o Erro-Padrão (em fórmula matemática tem-se que  $PEC = 1,6449 EP$ ). Esse erro-padrão isolado em um produto cartográfico não ultrapassará 60,8% do PEC. Ainda nesse sentido, o EP é declarado correspondente ao cálculo dado pelas expressões matemáticas de Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático. Com propósito de automatizar e facilitar os cálculos do PEC, foi desenvolvido o software GeoPEC.

Ademais, na prática, esse erro está diretamente relacionado à classificação dos produtos cartográficos quanto à exatidão, sendo a mensuração básica para o controle de qualidade das cartas em serviços cartográficos (SANTOS *et al.*, 2010).

A partir desses cálculos, caracterizam-se os produtos cartográficos em Classes A, B e C, seguindo os critérios de Padrão de Exatidão Cartográfico Planimétrico e Altimétrico. Conforme o Decreto nº 89.817 (1984) classifica abaixo:

a - Classe A

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

b - Classe B

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala, da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c - Classe C

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Por fim, essas classes são resumidas no Quadro 1 abaixo.

Carta	PEC Planimétrico	Erro padrão	PEC Altimétrico	Erro padrão
Classe A	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala	1/2 equidistância	1/3 da equidistância
Classe B	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala	3/5 equidistância	2/5 da equidistância
Classe C	1,0 mm x Escala	0,6 mm x Escala	3/4 equidistância	1/2 da equidistância

Quadro 1 – Critérios do PEC

Fonte: Decreto Nº 89.817 de 20 de Junho de 1984

Quadro 1. Classes de classificação de produtos cartográficos de acordo com PEC.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo foram desenvolvidas etapas de trabalho alternadas em atividades de campo e escritório.

No início foram realizadas coleta de dados em campo com intuito de selecionar a área de estudo, observando as características necessárias e adequadas para o desenvolvimento dele. Após a escolha da área foram estabelecidos os parâmetros e planejamento das atividades a serem desenvolvidas.

Para facilitar a compreensão do leitor, serão descritos os equipamentos e softwares usados nesse estudo e, em seguida, a metodologia de uso.

#### 3.1 Área de Estudo

O presente estudo foi realizado em área situada na macrozona urbana segundo o PDOT-DF, na Região Administrativa Sobradinho II (RA XXVI), localizada no Distrito Federal e está inserida na Bacia Hidrográfica do São Bartolomeu, Figura 13. A vegetação da área de estudo é composta por remanescentes da fisionomia Cerrado Sentido Restrito, que consiste em uma vegetação do tipo arbustivo e arbórea (RIBEIRO e WALTER, 2008). A área também conta com uma vegetação rasteira predominantemente pelo capim do gênero *Brachiaria*.

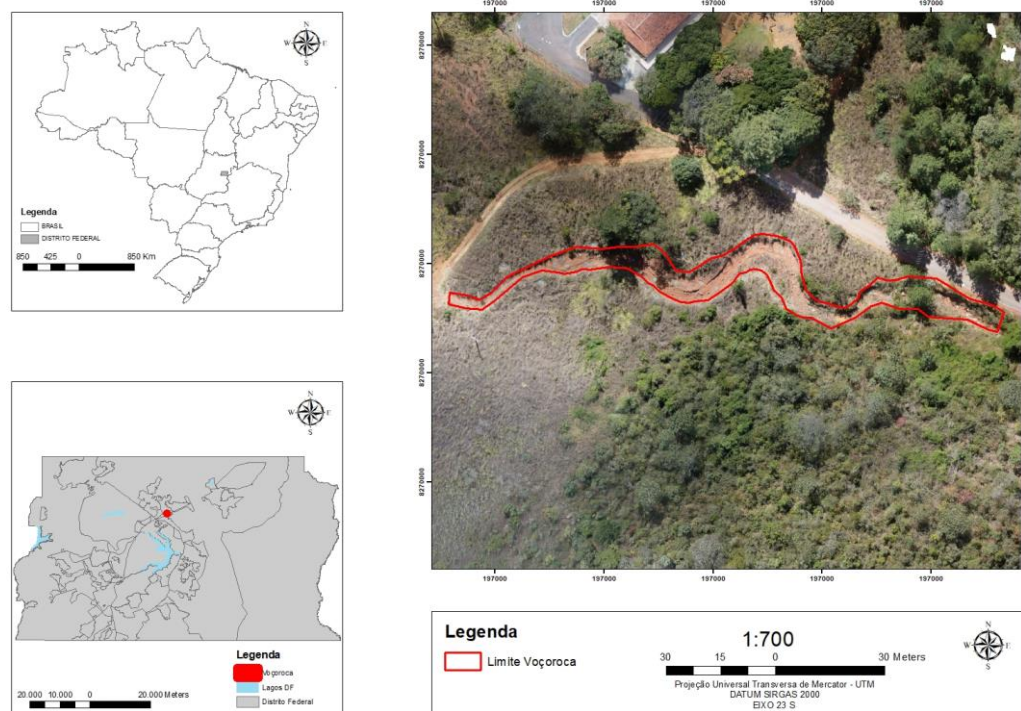


Figura 13. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: O autor.



O clima do Distrito Federal é predominantemente do tipo Aw na classificação climática de Köppen-Geiger, que tipifica essa região como Tropical com estação seca no inverno, com temperatura média anual de 23,4°C e precipitação pluviométrica média anual em torno de 1500 mm (CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014).

O Distrito Federal é composto principalmente por três classes de solos como os Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelhos-Amarelos e Cambissolos. Com uma abrangência de 54,50% da área total do DF, os Latossolos, do latim *lat* “tijolo”, são solos intensamente intemperizados decorrente da remoção de sílica e de bases trocáveis do perfil. Esses são solos minerais, não hidromórficos e profundos, que apresentam alta permeabilidade de água e são distróficos e ácidos (REATTO *et al.*, 2004).

A voçoroca do presente estudo se apresenta em um estágio avançado e está situada em solo do tipo Cambissolos háplico conforme a Foto 1. Apresenta forma irregular, com formatos de seção transversal tanto em “U” quanto em “V”, sendo uma voçoroca com relevante sinuosidade. Tem extensão de 170 metros, abrange área de 1.120,80 m<sup>2</sup>, com uma largura média de 7 metros.



Foto 1. Perfil do solo da Voçoroca. Fonte: O autor.

## 3.2 Material

### 3.2.1 Aeronave Remotamente Pilotada

A RPA utilizada é do tipo quadróptero multirotor desenvolvido pelo fabricante DJI e o modelo é o Phantom 4 pro, conforme Foto 2. Com peso aproximado de 1388 g enquadra-se na classe 3 de acordo com a definição da ANAC com peso máximo de decolagem menor ou igual

a 25kg. Essa aeronave conta com uma câmera que capta imagens na faixa visível do espectro eletromagnético nas bandas Red, Green e Blue (RGB). O sensor da câmera tem 1” CMOS de 20 megapixels, lente FOV 84° 8,8 mm/ 24 mm, f/2.8 – f/11 com foco automático a 1 m e estabilizador de 3 eixos (yaw, pitch, roll).

Por se tratar de uma aeronave de pequeno porte, conta com uma bateria inteligente do tipo LiPo 4S, de 468 gramas e 5870 mAh, apresentando autonomia máxima de voo de 30 minutos. Essa RPA embarca o Sistema de Posicionamento por Satélite GPS e GLONASS.



Foto 2. Dji Phantom 4 Pro. Fonte: O autor.

### 3.2.2 Receptor de sinais GNSS

O par de receptores de sinais GNSS utilizado neste estudo é da marca NavCom-John Deer e corresponde ao modelo SF-3040, operando no método de rastreamento dos pontos do tipo RTK (*Real Time Kinematic*) convencional banda L1 e L2. No método RTK o equipamento alcança precisão horizontal de 10mm + 0,5ppm e precisão vertical de 20mm + 1ppm. Tem como base de referência processada pelo método PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), ferramenta disponível pelo site IBGE, com tempo total de rastreamento em modo estático acima de 2 horas.



Figura 14. GPS GNSS NAVCOM-John Deere. Fonte: Topomap, 2020.

### 3.2.3 Pontos de controle e verificação

Os pontos de controle (*control points*) e pontos de verificação (*checking points*) são alvos artificiais de fácil identificação no terreno, podem ser alvos fixos já existentes ou produzidos para longa duração, ou alvos improvisados para um determinado levantamento. Esses alvos são identificados e utilizados no processamento das imagens para a devida correção das coordenadas geográficas.

Os alvos alocados em campo para este estudo, foram confeccionados a partir de uma lona plástica azul com dimensões 80 x 60cm e spray de cor preta para definir seu ponto central, Foto 3.



Foto 3. Ponto de controle alocado em campo. Fonte: o autor.

### 3.2.4 Softwares

#### 3.2.4.1 DroneDeploy

Para realizar o voo de recobrimento de toda a área de estudo, foi operado o *software* de planejamento de voo de aeronaves remotamente pilotadas da marca DroneDeploy. Esse aplicativo permite ao usuário planejar um voo automatizado pela inserção de waypoints e definição de alguns parâmetros como: altitude de voo, GSD, velocidade de mapeamento, ângulo de captura das fotos e porcentagem de sobreposição das fotos.

O *software* DroneDeploy está disponível para *download* gratuito e pode ser usado tanto em computadores e notebooks quanto em dispositivos *mobile*.

#### 3.2.4.2 Agisoft Metashape

Com a finalidade de processar as imagens e produzir os produtos cartográficos digitais a partir das imagens obtidas pela RPA, foi utilizado o *software* Agisoft Metashape. Este software é autônomo e permite processar imagens de câmeras RGB ou multiespectrais, incluindo sistemas de múltiplas câmeras, gerando dados espaciais 3D para serem usados em aplicativos GIS. O Agisoft Metashape é ainda capaz de realizar a triangulação fotogramétrica, nuvem de pontos, modelo digital de superfície (MDS), modelo digital de terreno (MDT) e ortomosaico georreferenciado (AGISOFT, 2006).

#### 3.2.4.3 ArcMap

Os produtos cartográficos gerados pelo processamento de imagens e processamento de pontos no caso da RPA e topografia convencional respectivamente, foram inseridos e trabalhados na plataforma GIS ArcMap® 10.6. O ArcMap® é um programa que permite o processamento de dados geoespaciais, possibilitando a edição, a criação e a análise de tais dados.

#### 3.2.4.4 GeoPEC

O GeoPEC é um *software* de fácil utilização, que proporciona aos profissionais que utilizam produtos cartográficos, o processamento e a avaliação da acurácia posicional dos produtos (GeoPEC, 2020). Neste *software* são utilizadas três normas e padrões, tais como: acurácia posicional de produtos cartográficos utilizando o Decreto nº. 89.817, inspeção topográfica através da NBR 13.133 e avaliação de ortofotos de aerolevanteamento e bases cartográficas utilizadas no processo de Georreferenciamento de Imóveis Rurais segundo Norma de Execução n. 02 de 2018 do INCRA.

Tal programa pode ser considerado “genérico” devido ao fato de avaliar a qualidade posicional em qualquer tipo de dado espacial, como mapas, ortoimagem, arquivos vetoriais, arquivos raster, entre outros (GeoPEC, 2019).

#### **3.2.4.5 Microsoft Excel**

Para elaboração dos cálculos e gráficos dos perfis topográficos, foi utilizado o *software* Excel.

### **3.3 Métodos**

As etapas da metodologia deste estudo estão evidenciadas no fluxograma abaixo (Figura 15), para facilitar a compreensão do leitor.

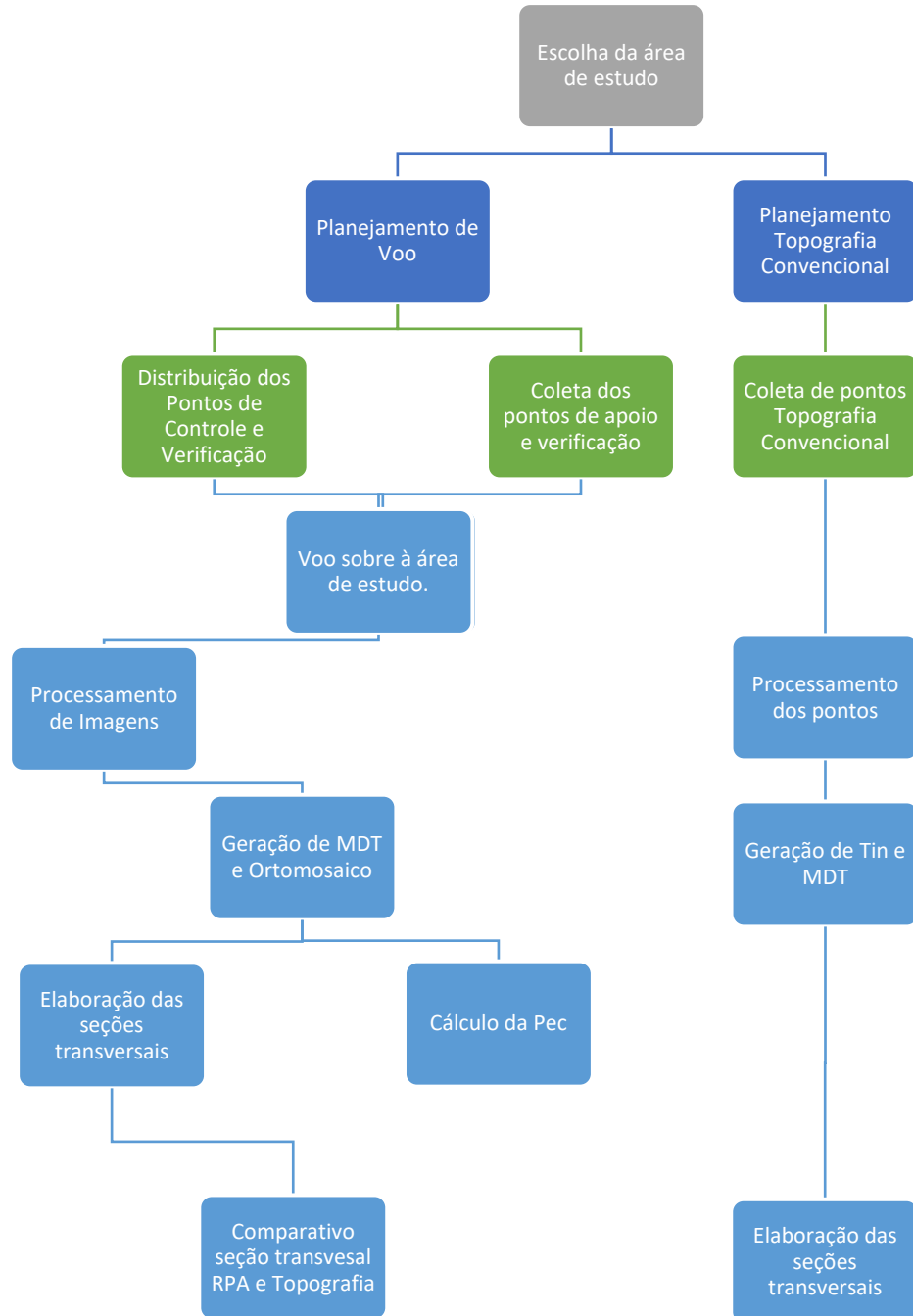


Figura 15. Fluxograma das etapas da metodologia do estudo. Fonte: o Autor.

### 3.3.1 Levantamento topográfico

A fim de realizar o levantamento topográfico convencional, foi utilizado o receptor GNSS operando o método RTK. Com o objetivo de otimizar o tempo e o resultado, foi coletada uma malha de pontos ao longo de toda a voçoroca como se observa na Figura 16. Foram coletados pontos no meio, na base, na crista e a cinco metros da crista da voçoroca. Todo esse processo foi repetido a cada 10 metros em média. A Foto 4 apresenta a equipe de campo realizando o rastreamento dos pontos.



Foto 4. Coleta dos pontos referentes ao levantamento topográfico. Fonte: o autor.

No total, foram necessários dois dias de levantamento topográfico, realizado entre os dias 28 e 29 de julho de 2020. Após a coleta dos pontos em campo, o pós-processamento das coordenadas móveis foi realizado utilizando o *software* StarPoint, tendo como projeção UTM – Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000.

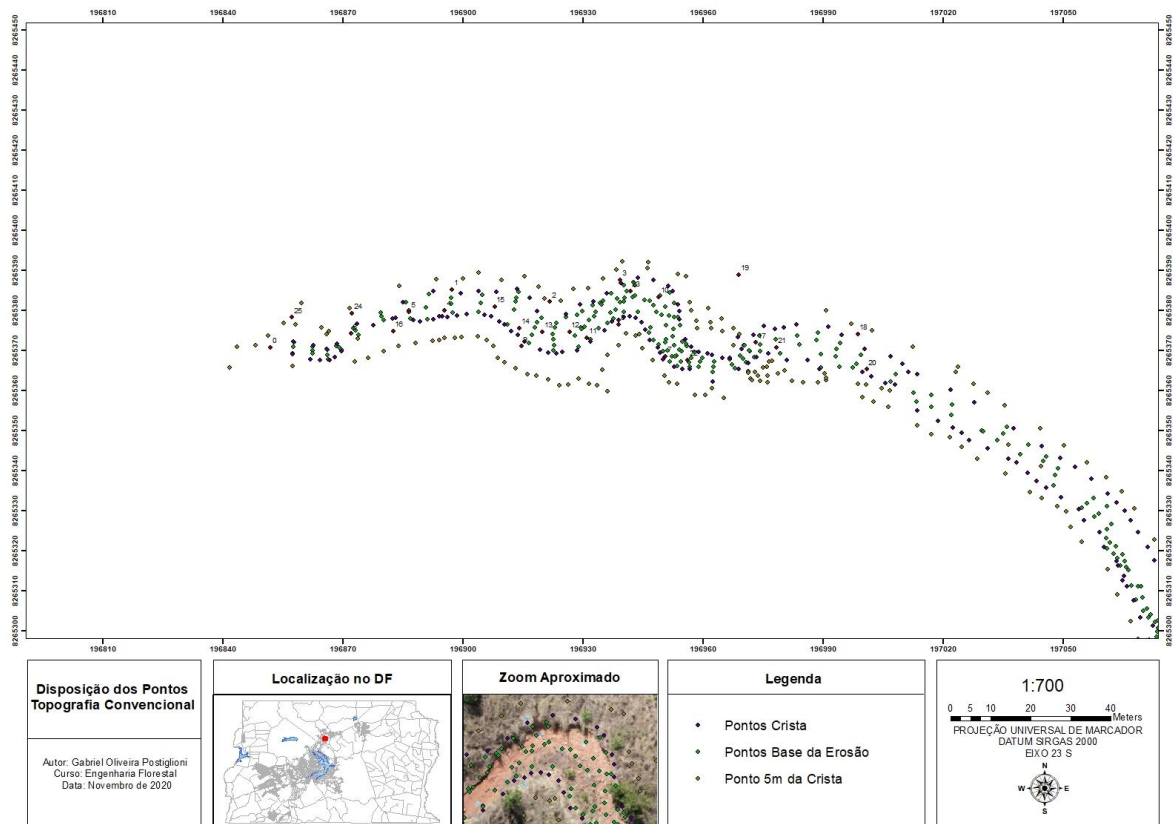


Figura 16. Mapa da disposição dos pontos coletados pela topografia convencional. Fonte: O autor.

A partir dos pontos levantados pela topografia convencional, foi possível delimitar área da voçoroca e gerar a Rede Triangular Irregular (TIN) dentro da plataforma do ArcMap® 10.6, utilizando a ferramenta Creat TIN. A Figura 17 apresenta o mapa com o TIN.

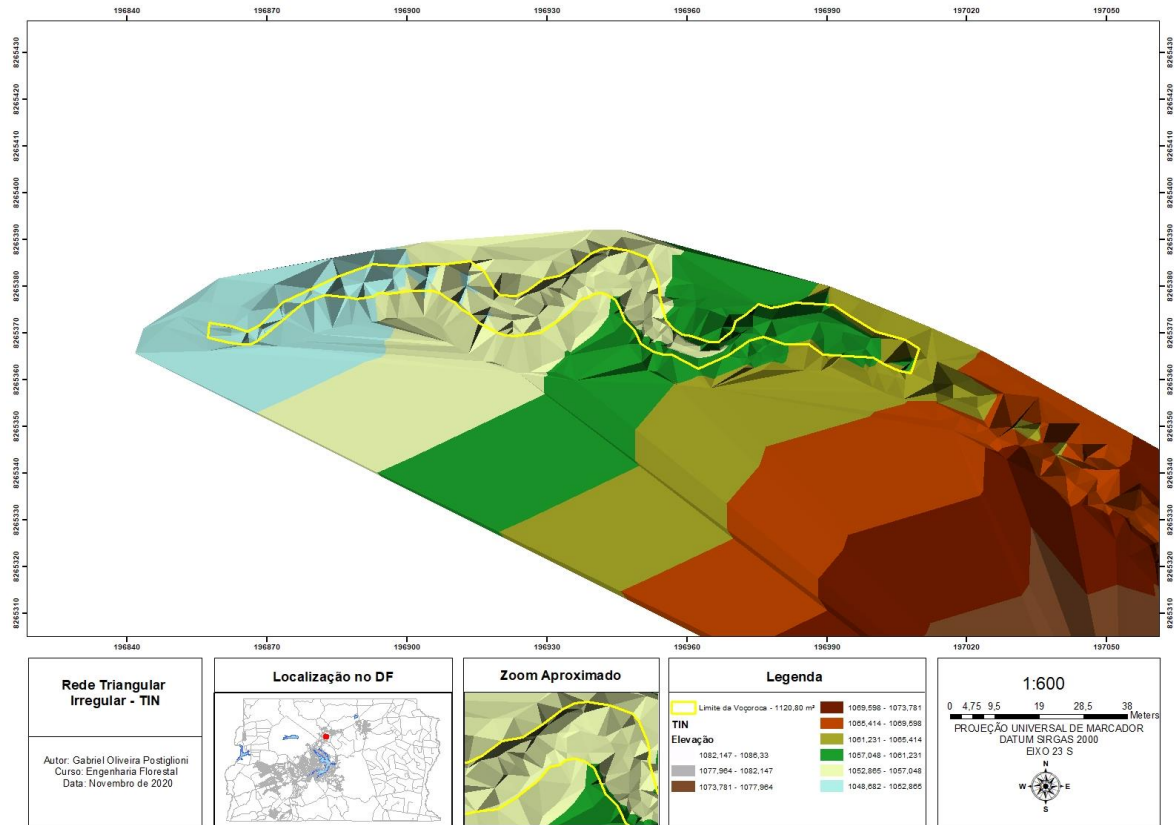


Figura 17. Mapa da Rede Triangular Irregular - TIN. Fonte: O autor.

Após confecção do TIN, foi possível criar o modelo digital de terreno (MDT) com os dados da topografia convencional, no mesmo software. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *TIN to Raster* que se encontra no *3D analyst*. O resultado obtido está presente na Figura 18.



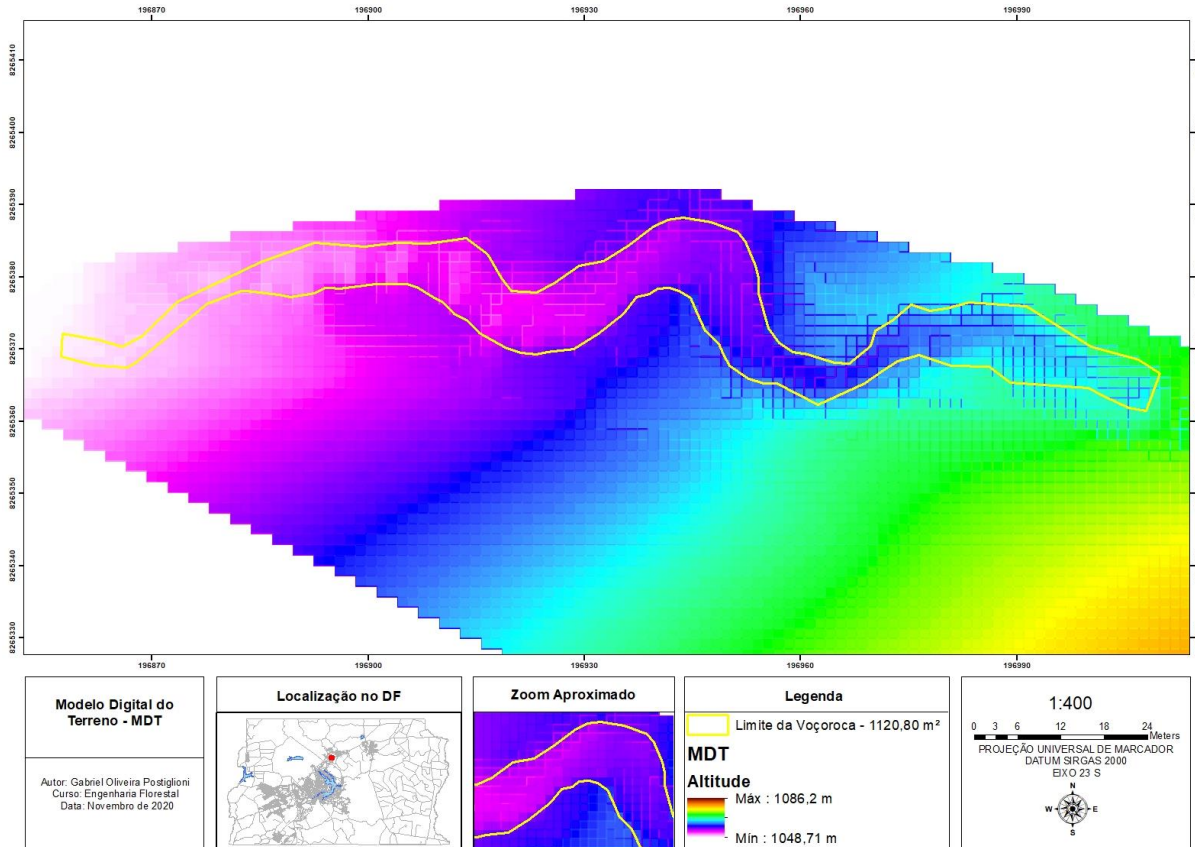


Figura 18. MDT gerado pelos dados da topografia convencional. Fonte: O autor.

### 3.3.2 Planejamento de Voo

A área delimitada para o devido planejamento de voo contém cerca de 3 hectares, que recobre uma porcentagem de área maior que o perímetro da voçoroca do estudo, visando alcançar uma ótima sobreposição das fotos. A Figura 19 apresenta as linhas de voo que foram percorridas pela RPA.

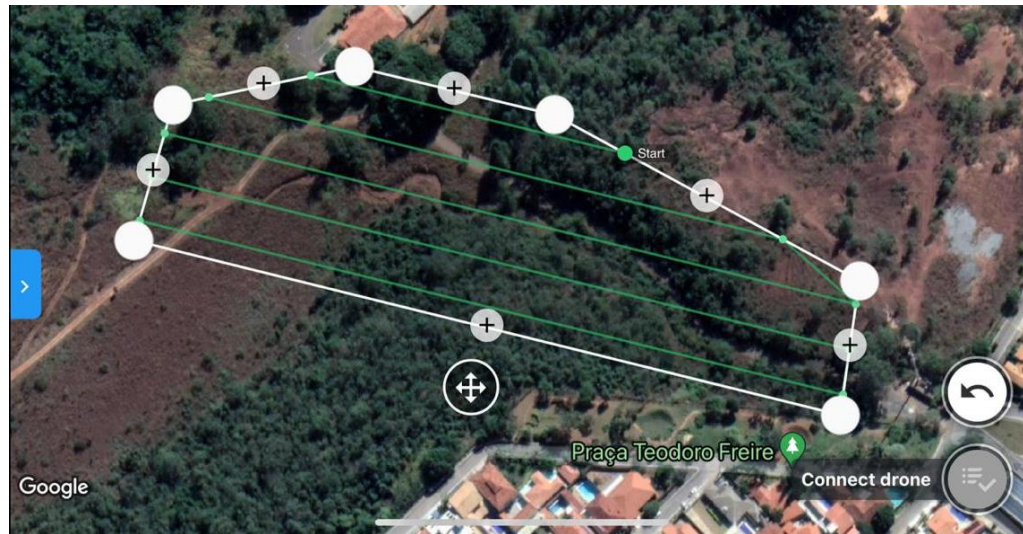


Figura 19. Planejamento de voo realizado no aplicativo DroneDeploy. Fonte: Adaptado de Dronedeploy, 2020.

Os parâmetros básicos utilizados no planejamento de voo automatizado no aplicativo DroneDeploy estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no planejamento de voo.

Parâmetro	Valor
Altitude	90 metros
Área	3 hectares
Sobreposição frontal	80 %
Sobreposição lateral	80 %
Velocidade	6 m/s
GSD	2.34 cm/pix
Tempo estimado de Voo	7 minutos

### 3.3.3 Distribuição de pontos de controle e verificação

Ao todo foram distribuídos 26 pontos ao longo da área de estudo, sendo 19 pontos de controle e 7 pontos de verificação. Neste estudo, optou-se por distribuir os pontos de forma aleatória e as suas coordenadas foram rastreadas utilizando o mesmo receptor GNSS utilizado pelo levantamento topográfico conforme Foto 5, operando o método RTK. A Figura 20 demonstra a disposição dos pontos em campo.



Foto 5. Rastreio das coordenadas dos pontos de controle. Fonte: O autor.

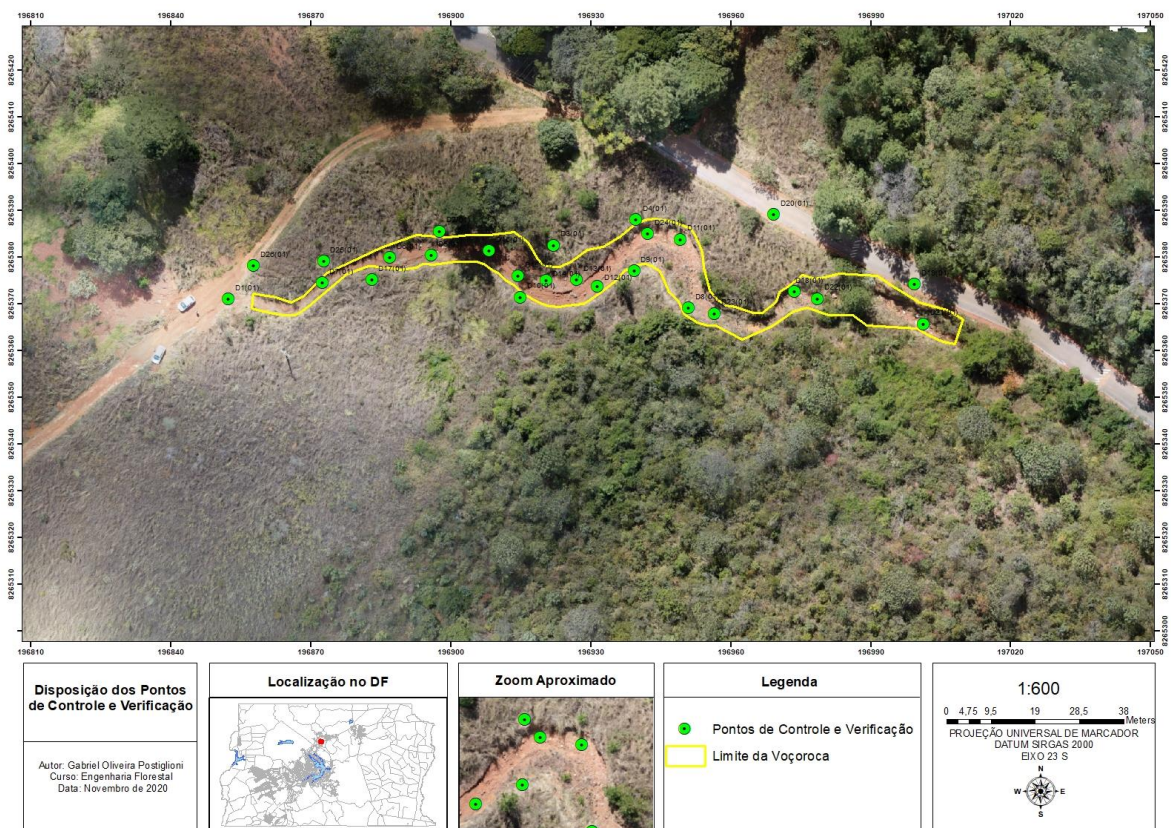


Figura 20: Localização dos pontos de controle e verificação na área de estudo. Fonte: O autor.

### 3.3.4 Processamento de Imagens

O processamento de imagens foi realizado a partir do *software* Agisoft Metashape e compreendeu as seguintes etapas: alinhamento das fotos, amarração dos pontos de controle e verificação, construção da nuvem de pontos densa, construção do modelo 3D, elaboração do

modelo digital de superfície (MDS), filtragem e eliminação dos elementos do MDS para elaboração do modelo digital de terreno (MDT). Por fim, foi criado o ortomosaico georreferenciado. A Figura 21 apresenta a nuvem de pontos densa gerada no Agisoft.



Figura 21. Nuvem de pontos densa gerada pelo Agisoft Metashape. Fonte: Adaptado Agisoft Metashape, 2020.

### 3.3.5 Verificação da Acurácia

Após à elaboração dos produtos cartográficos digitais pela metodologia de RPA, foi analisada sua acurácia posicional, tanto para planimetria, quanto para altimetria. Para isso, os dados foram inseridos no *software* GeoPEC.

Os dados de entrada no *software* foram as coordenadas geográficas (x, y, z) dos pontos de controle e de verificação, rastreadas pelo receptor GNSS, e as coordenadas geográficas (x, y, z) do ponto central dos pontos de controle e de verificação, visualizadas pelo ortomosaico georreferenciado, conforme a Figura 22. Esses dados do ortomosaico foram extraídos no ArcMap® 10.6 pela tabela de atributos dos pontos.

A verificação da acurácia posicional seguiu os padrões da PEC e foram empregados todos os pontos de controle e de verificação levantados em campo e utilizados no processamento de imagens. Assim, para a devida verificação dos padrões de exatidão, as coordenadas foram testadas para uma escala de 1/1.000 e 1/2.000 no cálculo da planimetria. No cálculo da altimetria foram testadas com equidistância de curvas de nível em 2 metros.

Entrada de Dados (Decreto 89.817 / INCRA)

Adicionar Deletar Primeiro Anterior Próximo Último

Ponto	Descrição	E(m) teste	N(m) teste	h(m) teste	E(m) referência	N(m) referência	h(m) referência	2D - Não considerar?	Z - Não considerar?
d10		196952,384	8265371,012	1049,435	196851,836611	8265370,76472	1049,123535		
d11		196914,994	8265371,437	1054,729	196914,571235	8265371,03785	1054,46936		
d12		196949,325	8265383,832	1055,103	196949,984071	8265383,33498	1054,650757		
d13		196931,495	8265373,727	1053,825	196931,022652	8265373,19507	1053,402832		
d14		196927,128	8265375,139	1053,748	196926,645909	8265374,62708	1053,352905		
d15		196920,462	8265375,034	1053,591	196919,903277	8265374,63724	1053,107788		
d16		196914,484	8265375,925	1052,5	196914,070526	8265375,57678	1052,190186		
d17		196908,368	8265381,38	1052,419	196907,934032	8265380,99017	1051,992085		
d18		196883,115	8265375,164	1051,558	196882,463941	8265374,8519	1051,427439		
d19		196873,779	8265372,593	1057,643	196873,277501	8265371,98579	1057,47876		
d20		196999,53	8265374,171	1061,7	196998,777961	8265374,06754	1061,848633		
d21		196897,714	8265385,552	1052,775	196897,195413	8265385,16847	1052,714722		
d22		196969,37	8265389,163	1059,03	196968,992433	8265388,94549	1058,082275		
d23		197001,414	8265365,707	1059,867	197000,930064	8265365,31658	1059,133789		
d24		196978,734	8265371,074	1059,019	196978,321594	8265370,73019	1057,75061		
d25		196956,597	8265367,926	1056,645	196956,244992	8265367,6641	1055,954834		
d26		196942,331	8265385,006	1054,847	196941,793994	8265384,82783	1054,023438		
d27		196872,8	8265379,171	1051,375	196872,159358	8265379,22659	1050,665771		
d28		196857,818	8265378,219	1049,602	196857,243708	8265378,24075	1048,751831		
d29		196922,108	8265382,52	1055,056	196921,685816	8265382,12831	1054,87915		
d30		196939,777	8265388,008	1056,482	196939,369608	8265387,58541	1056,136963		
d31		196895,937	8265380,39	1051,31	196895,422869	8265380,0495	1050,338354		
d32		196887,031	8265379,962	1051,085	196886,531581	8265379,65624	1050,628174		
d33		196872,526	8265374,554	1050,186	196871,938441	8265374,17124	1050,117676		
d34		196951,104	8265369,105	1057,616	196950,68217	8265368,57571	1057,053711		
d35		196939,392	8265377,062	1056,192	196938,927095	8265376,52527	1055,778687		

Figura 22. Dados de entrada no software GeoPEC. Fonte: Adaptado GeoPEC, 2020.

### 3.3.6 Seções Transversais

Após elaboração dos dois modelos digitais de terrenos a partir das diferentes metodologias (RPA e topografia convencional), foram projetadas 15 seções transversais ao longo de toda a voçoroca. As seções estão com equidistância de 10 metros entre si, e foram elaboradas no ArcMap® 10.6, conforme a Figura 23.

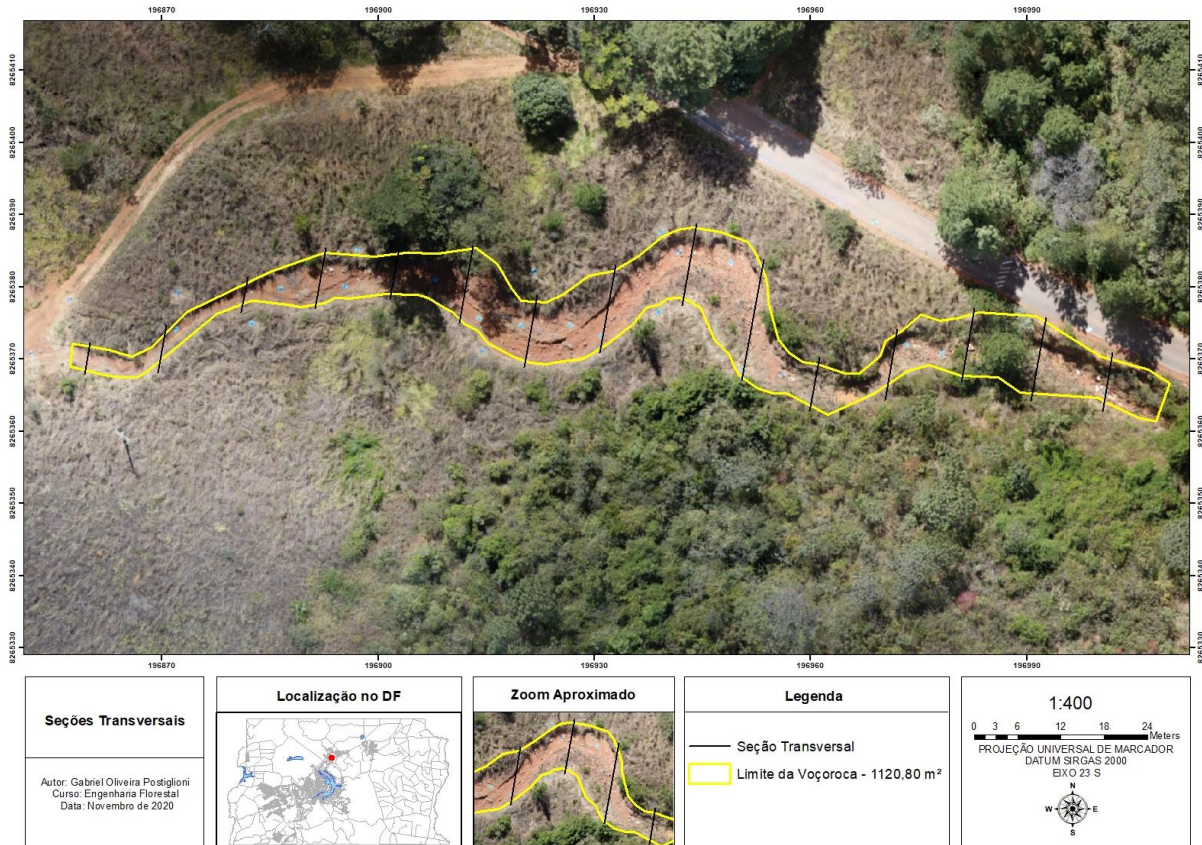


Figura 23. Disposição das seções transversais ao longo da Voçoroca. Fonte: O autor.

### 3.3.7 Análise estatística

As devidas análises estatísticas referente às seções transversais foram calculadas no Microsoft Excel a partir das fórmulas enumeradas abaixo:

- Erro absoluto: cálculo da diferença entre o valor observado e o valor real.

$$Eabs = X0 - X \quad (1)$$

- Média aritmética

$$\bar{X} = \frac{X1+X2+X3...Xn}{n} \quad (2)$$

- Desvio padrão

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum(Xi - xt)^2}{n}} \quad (3)$$

A avaliação da discrepância das seções transversais da voçoroca foi estimada a partir do Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para auxiliar a análise e interpretação dos comportamentos obtidos pelas seções. Esse coeficiente foi desenvolvido para criar um modelo adequado de transformação da água da chuva em uma descarga hidrológica e de uma provável descrição física da captação dessa água, assim, é possível obter a previsão do fluxo de um rio por meio

de modelos conceituais hidrológicos (NASH; SUTCLIFFE, 1970). O NSE é uma análise estatística amplamente utilizada e potencialmente confiável para avaliar a qualidade da estimativa dos modelos hidrológicos. No entanto, as análises desse coeficiente mostram que “outliers” podem influenciar significativamente nos resultados, mesmo assim pode ser uma estatística fundamentada, caso seja interpretada corretamente (MCCUEN; KNIGHT; CUTTER, 2006). Modelos hidrológicos não lineares, como exemplo da voçoroca, podem obter resultados negativos, mas normalmente o NSE se apresenta em modelos lineares de 0 a +1, onde 1 indica que o modelo hidrológico estimado é exatamente igual ao real, ou seja, o modelo produzido obtém uma variância de erro de estimativa igual a zero, assim, quanto mais próximo de 0 maior a discrepância entre o real e a previsão.

A fórmula desse coeficiente é apresentada como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

### 3.3.8 Volume

Com o propósito de calcular e comparar o volume da voçoroca deste estudo, foi utilizado o *software* ArcGIS® 10.6, ferramenta do ArcToolBox disponível no 3D *Analyst*, denominada como *Polygon Volume*. Esta ferramenta foi desenvolvida para calcular o volume de determinada superfície dentro de um polígono definido, empregando um plano de referência para isso. No presente estudo, o volume da voçoroca foi calculado a partir do interior do polígono do MDT gerado pela RPA e pela topografia convencional.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelo *software* GeoPEC demonstram que o produto cartográfico digital elaborado a partir dos dados da RPA é classificado como C em planimetria, em escala 1/1000 conforme o Decreto n° 89.817. A análise de tendência desse produto feita pelo método T de *Student* resultou em um padrão tendencioso, apresentando efeito sistemático. O padrão de distância espacial (vizinho mais próximo) resultou em agrupado nas três ordens observadas. Em síntese, a Tabela 2 apresenta as estatísticas básicas das discrepâncias para planimetria calculadas usando o Agisoft.

Tabela 2. Resultados das estatísticas básicas para planimetria conforme PEC.

<b>Planimetria</b>			
Estatística	Este (m)	Norte (m)	Posicional (m)
Nº Pontos	26	26	26
Média	0,4919	0,3443	0,6228
Desvio padrão	0,0973	0,1628	0,0869
Variância	0,009	0,027	0,008
RMS	0,5011	0,3795	0,6286
Máximo	0,752	0,6072	0,7875
Mínimo	0,3409	-0,0556	0,4358
Curtose	3,071	3,177	2,633
Assimetria	0,687	-0,78	-0,226
Soma	0,237	0,663	0,189
Nº outliers	-	-	0
PEC		C	

No entanto, os resultados obtidos para a altimetria revelaram que o produto cartográfico digital foi reprovado e culmina em nenhuma classe de acordo com os padrões da PEC, quando se utiliza como parâmetro de referência as curvas de nível com equidistância de 1 metro. Já para equidistância das curvas de nível em 2 metros, o PCD se enquadra na classificação B da PEC. Considerando essa equidistância em 2 metros, os resultados dos cálculos da estatística básica para altimétrica estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados das estatísticas básicas para altimetria conforme PEC.

<b>Altimetria</b>	
Estatística	Altitude (m)
Nº Pontos	26
Média	0,4494
Desvio padrão	0,3129
Variância	0,098
RMS	0,5441
Máximo	1,2684
Mínimo	-0,1486
Curtose	3,0823
Assimetria	0,5373
Soma	11,684
Nº outliers	0

O PCD analisado pelo PEC estabelece que a diferença altimétrica máxima foi 1,2 metros e a mínima, inferior a 0,2 metros. Da mesma forma, tem-se que a média da discrepância altimétrica resultou em 0,45 metros e o desvio padrão, em 0,31 metros.



A raiz do valor quadrático médio (RMS) calculado representa uma medida de acurácia, a qual verifica a discrepância posicional em um PCD, logo, o valor obtido para altimetria foi 0,54 metros. A Figura 24, apresenta o gráfico da discrepância posicional altimétrica calculada.

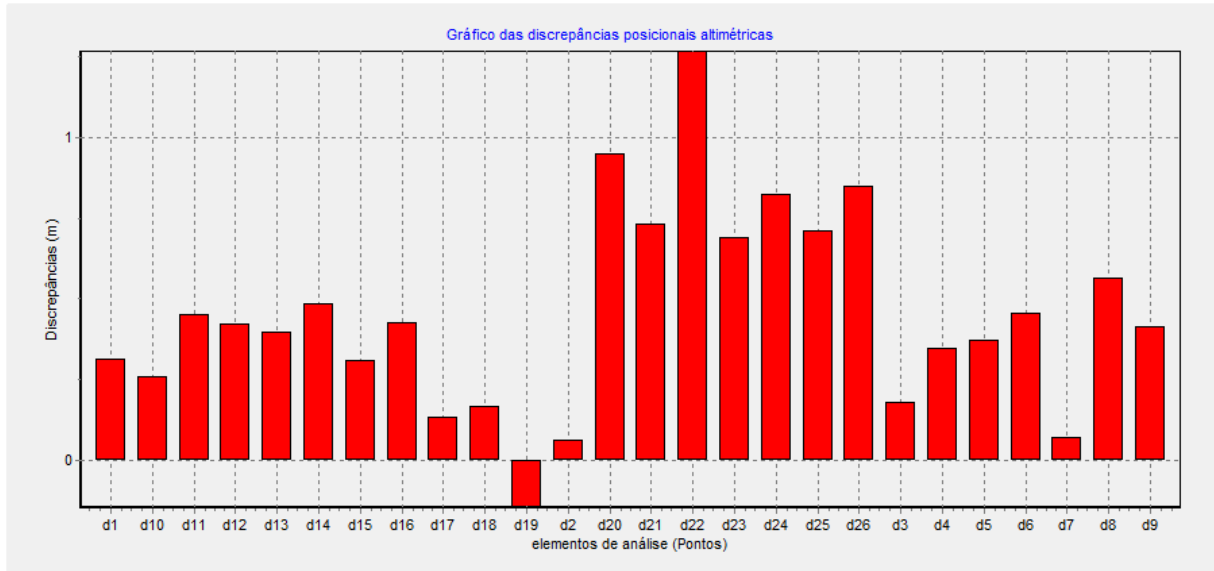


Figura 24. Gráfico das discrepâncias posicionais altimétricas, gerado pelo software GeoPEC, onde d é o ponto de controle verificado. Fonte: O autor.

Conforme o gráfico das discrepâncias posicionais altimétricas, foi possível observar que os pontos d22 e d20 apresentaram maior erro posicional. Tal erro pode estar relacionado com a calibração do receptor GNSS no momento em que foi utilizado para coletar esses pontos, pois os outros fatores que poderiam causar esse erro, foram descartados.

De posse desses resultados, foi possível verificar que o agrupamento na distribuição dos pontos de controle em campo resultou em uma acurácia posicional planimétrica e altimétrica inferiores às desejadas pela classificação da PEC. Em consonância com Zanetti et. al (2016), em seu trabalho, observou-se que o agrupamento de 15 pontos de controle em um local obteve um resultado inferior em comparação a pontos de controle distribuídos por toda a área de estudo. Entretanto, o PCD analisado obteve ainda uma classificação que se apresenta em concordância com o Decreto n° 89.817.

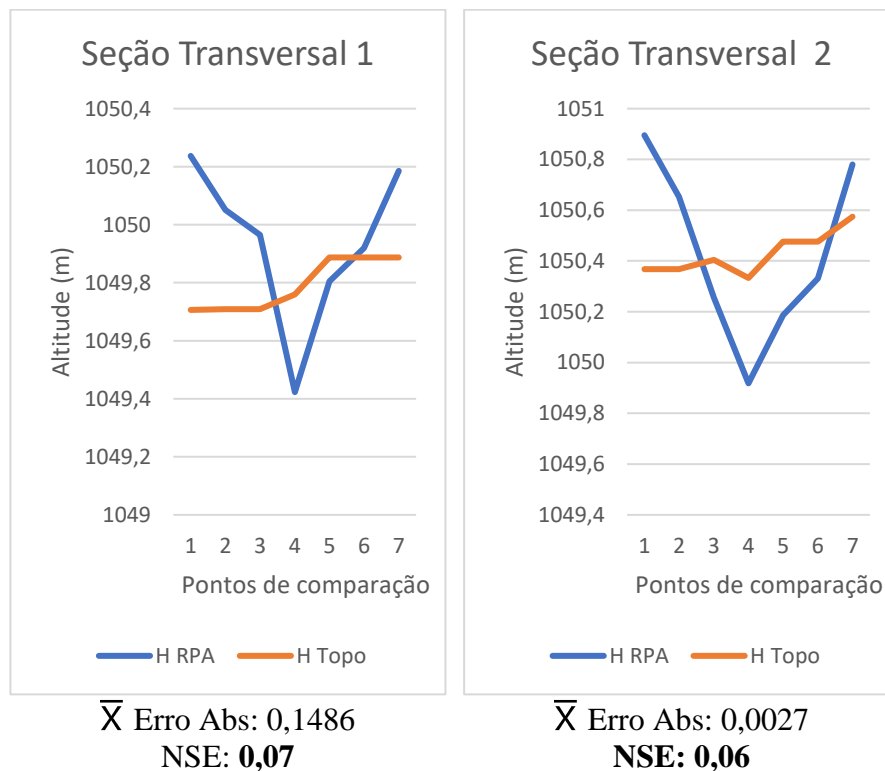
Cabe salientar que a voçoroca de estudo está localizada em uma área com vegetação nativa de cerrado e que ao longo de todo o seu perímetro é predominante a presença do capim do gênero *Brachiaria* (Foto 6). Tal característica de uso da terra aumentou o grau de dificuldade de distribuir os pontos de controle e uma verificação de forma mais ampla.

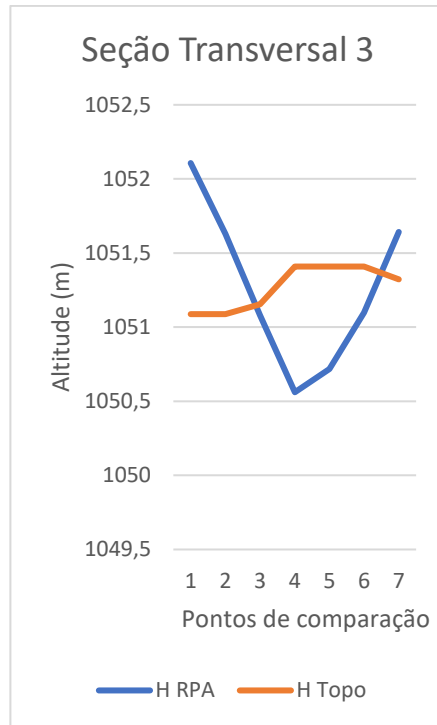


Foto 6. Registro da predominância do capim do gênero *Brachiaria* ao longo do perímetro da Voçoroca.

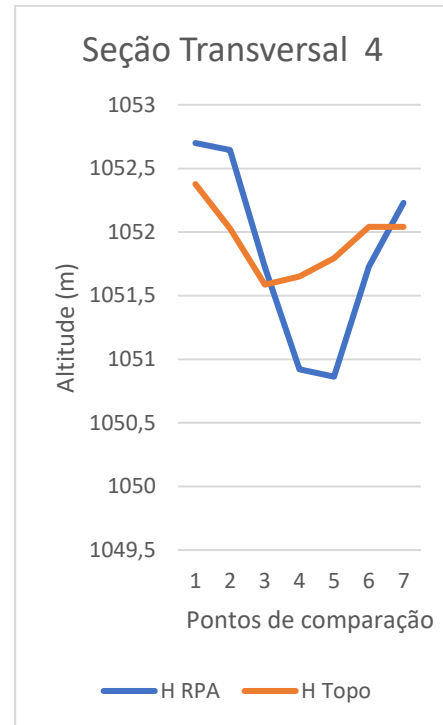
Fonte: O autor.

A partir das 15 seções transversais projetadas ao longo da voçoroca de estudo, foram elaborados gráficos do perfil topográfico dessas seções, visando analisar e interpretar a discrepância das seções criadas com os dados referentes à RPA e à Topografia Convencional. Além disso, foram calculados o erro absoluto médio das seções e o NSE. Os resultados de cada seção estão apresentados na Figura 25.

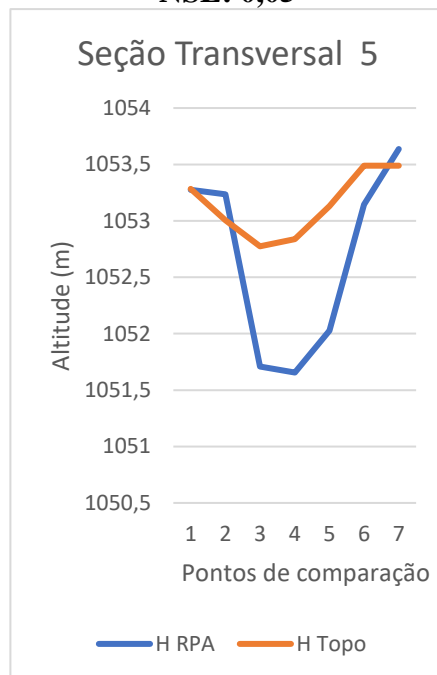




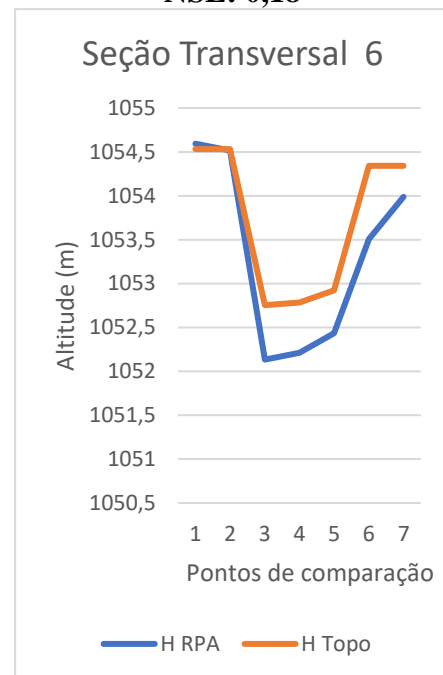
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,0060  
**NSE: 0,05**



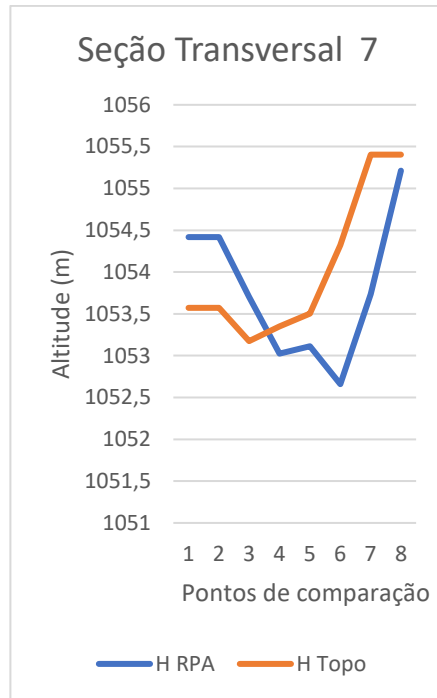
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,1018  
**NSE: 0,18**



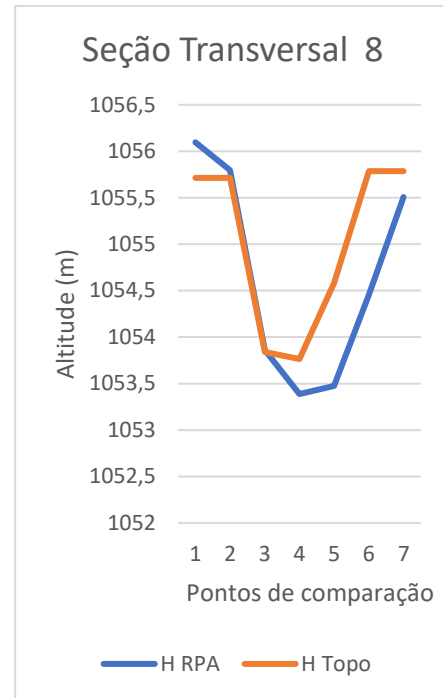
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,4755  
**NSE: 0,11**



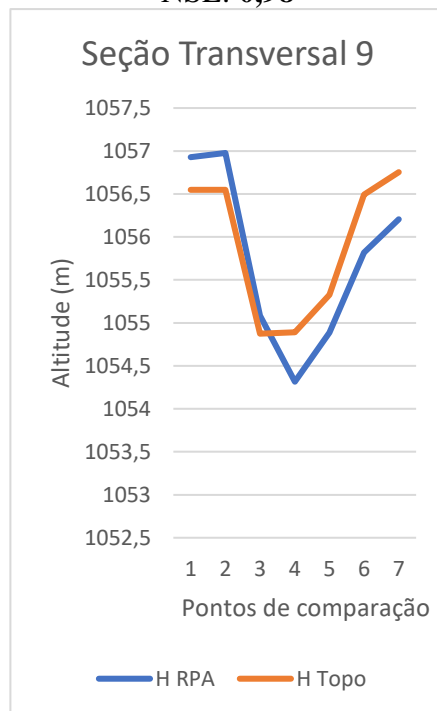
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,4045  
**NSE: 0,61**



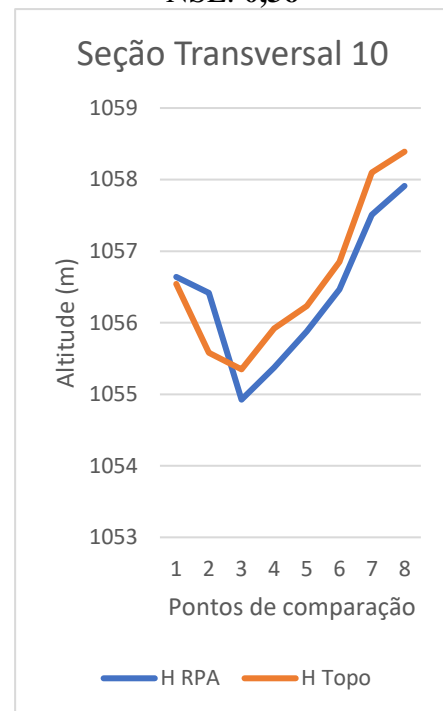
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,2519  
NSE: **0,98**



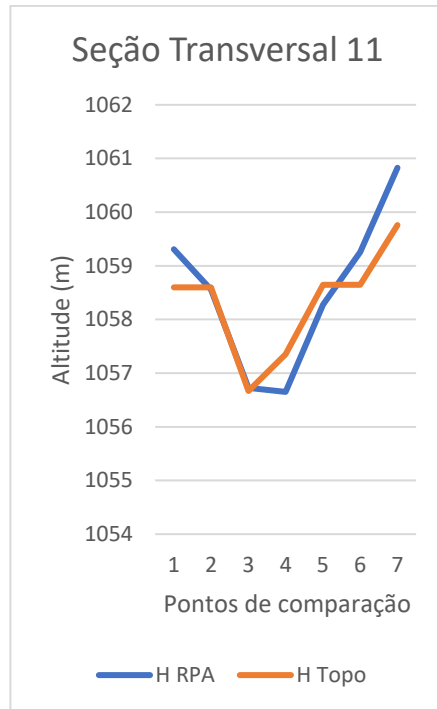
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,3726  
NSE: **0,36**



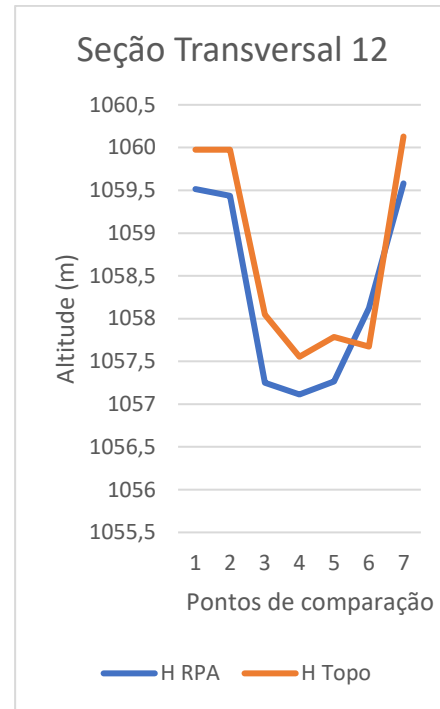
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,1743  
NSE: **0,62**



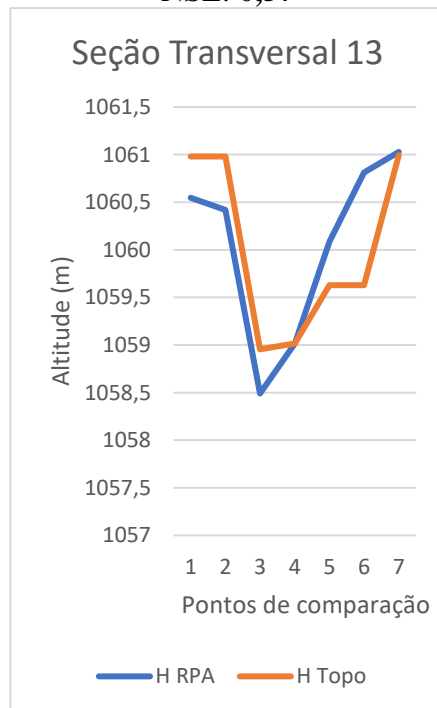
$\bar{X}$  Erro Abs: -0,2299  
NSE: **0,77**



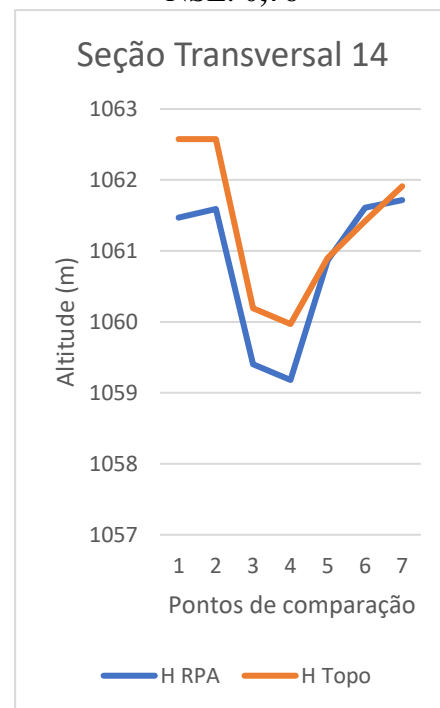
$\bar{X}$  Erro Abs: 0,1899  
NSE: **0,57**



$\bar{X}$  Erro Abs: -0,4094  
NSE: **0,76**



$\bar{X}$  Erro Abs: 0,0317  
NSE: **0,56**



$\bar{X}$  Erro Abs: -0,5296  
NSE: **0,48**

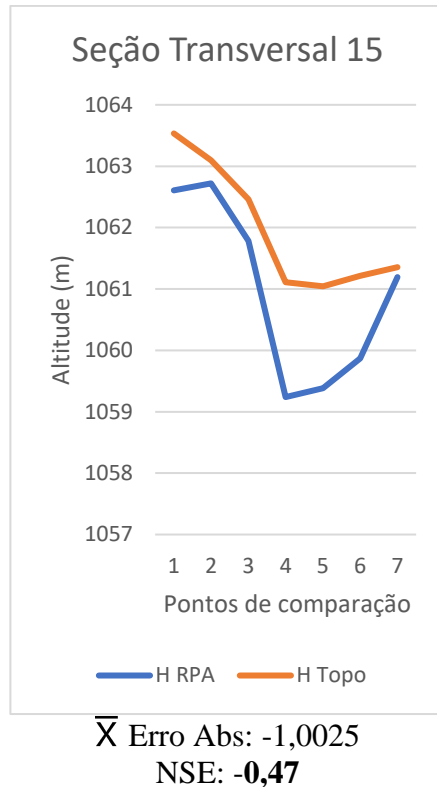


Figura 25. Gráficos do perfil topográfico das seções transversais. Fonte: o autor.

Destaca-se que as seções 1, 2 e 3 apresentaram a maior discrepância no que diz respeito ao subtipo da seção transversal da voçoroca. Segundo Dobek (2011), as seções transversais projetadas pela RPA têm forma de linhas de alcance superior em “V” e as seções projetadas pela topografia apresentam forma de linhas de escoamento de quedas. Essas diferenças no formato das seções 1, 2 e 3 podem estar atreladas à falta de dados levantados pelo receptor GNSS nos locais onde foram projetadas a seções, pois na metodologia empregada, os pontos foram levantados com distância de 10 m entre si. Então, tais pontos são importantes para a correta definição do terreno.

Além disso, a seção transversal 15 revelou o maior erro absoluto médio dentre as quinze seções. Segundo Ferreira *et al.* (2013), esse valor elevado do erro pode estar associado à presença de sombra no local da seção, cobertura vegetal e volumosos elementos rochosos, conforme a Foto 7. Tais fatores tornam complexo o processo de filtragem de elementos do MDS para a elaboração do MDT, o qual acarreta problemas na generalização do terreno e na criação do perfil topográfico com precisão.



Foto 7. Visada da voçoroca referente a seção transversal 15. Fonte: O autor.

Essa divergência pode ser explicada pelo fato de que a construção do MDT ser baseada em uma quantidade abundante de dados obtidos pela RPA, assim, no momento em que foi feita a filtragem da vegetação para a reconstrução da topografia do terreno, percebe-se que a estimativa da altitude do solo foi alterada devido à densidade vegetativa. Diante disso, a vegetação é um desafio nos fluxos de trabalho para a reconstrução de MDT com maior precisão (KOCI *et al.*, 2017).

A partir dos resultados do erro absoluto médio dos perfis das seções, foi calculada a estatística desses valores, que estão presentes na Tabela 4. Portanto, observa-se que a maior diferença do erro absoluto médio foi de -1,003 m e a menor diferença equivale a 0,19 m. O desvio padrão resultou em 0,31 metros. Nesse sentido, conforme a pesquisa produzida por Koci *et al.* (2017), verificou-se que a elevação de modelos digitais de terreno elaborados por RPAs encontrou erros verticais negativos de 1 a 1,5 metro, visto que como analisado pelo autor as áreas canalizadas apresentaram a tendência de subestimar as altitudes do terreno, mas ainda conseguem representar vastamente a forma da ravina. Assim, interpretando a presente pesquisa em comparação com o estudo de Koci *et al.* (2017), esse corrobora a fim de concluir que os erros médios estão de acordo com o presente na literatura.

Tabela 4. Resultados das estatísticas do erro absoluto médio das seções transversais.

Erro Absoluto médio	
Tamanho da amostra	15
Mínimo	-1,003
Máximo	0,190
Amplitude	1,192
Média	-0,215
Desvio Padrão	0,310
Variância	0,096

No gráfico da Figura 26 são representados os valores das discrepâncias do erro absoluto médio de cada seção.

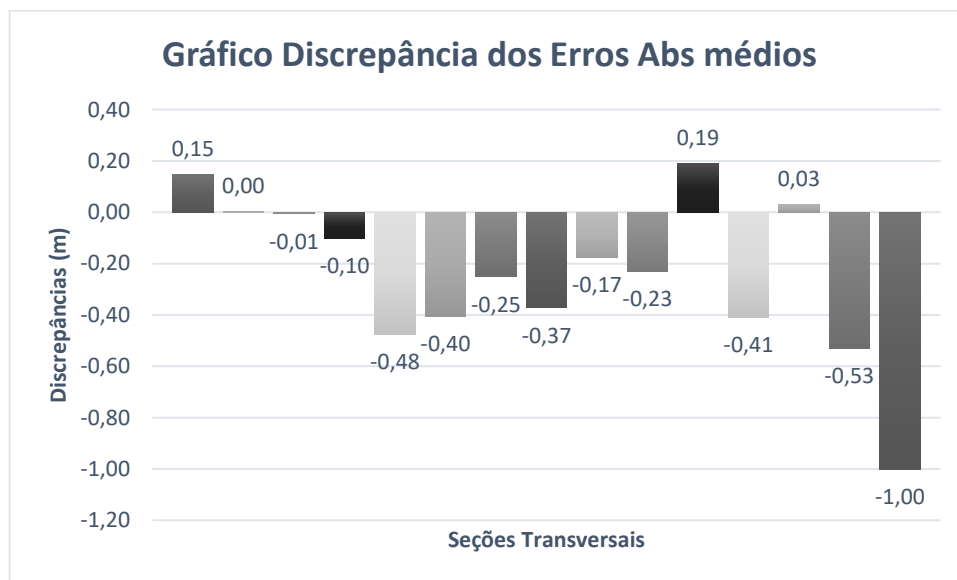


Figura 26. Discrepância da média dos erros absolutos para os dados RPA e Topografia Convencional.

Embora os erros absolutos médios do MDT gerados pela RPA sejam significantes em relação ao MDT da topografia, no geral as seções transversais da RPA correspondem à forma das seções da topografia convencional, mesmo que deslocados verticalmente.

Através dos cálculos do NSE, os valores obtidos em cada seção demonstram que sete seções tiveram resultados satisfatórios ( $NSE > 0,5$ ) e oito seções obtiveram resultados insatisfatórios ( $NSE < 0,5$ ). O valor mínimo do NSE foi de -0,47 m (Seção Transversal 15) indicando que o valor médio observado é um preditor melhor do que o valor simulado, tornando-se inaceitável, já o valor máximo do NSE foi de 0,98 m (Seção Transversal 7) chegando próximo do ideal (MORIASI *et al.*, 2007).



Tabela 5. Resultados das estatísticas do NSE das seções transversais.

NSE	
Tamanho da amostra	15
Mínimo	-0,470
Máximo	0,980
Amplitude	1,450
Média	0,380
Desvio Padrão	0,376
Variância	0,142

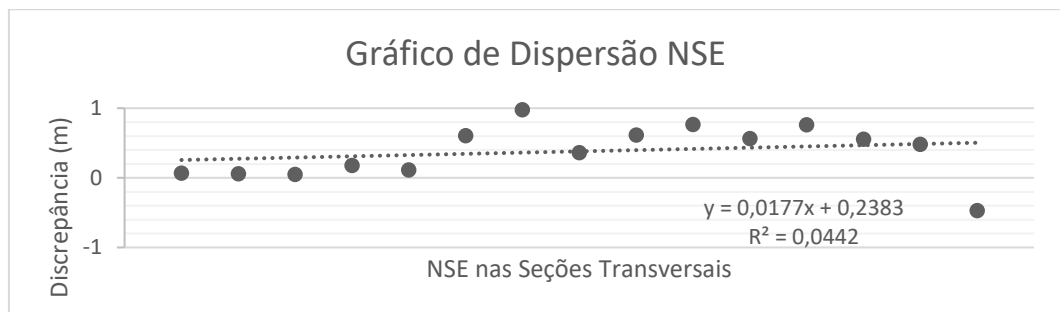


Figura 27. Dispersão NSE em relação a linha de tendência.

O desvio padrão obtido foi igual a 0,37 m. e a média dos valores calculados pelo coeficiente NSE foi de 0,38 m. Segundo Moriasi *et al.* (2007), os valores do NSE que variam entre 0,0 e 1,0 são considerados como níveis aceitáveis de desempenho, assim, a presente pesquisa obteve um coeficiente médio aceitável.

Diante o exposto, os valores apresentados pelo coeficiente NSE indicam que 46% de todas as seções obtiveram o modelo hidrológico predito mais próximo do real, visto que relataram coeficientes condizentes com a variância do erro de estimativa mais próximo de zero.

Observa-se que em certos seguimentos e em condições adequadas a RPA se apresenta como uma ferramenta complementar para modelagem e caracterização de voçoroca, a exemplo disso o solo exposto garantiria uma redução da dificuldade na filtragem dos dados, para confecção da topografia do terreno com maior precisão.

Com base nos MDTs gerados, o volume da voçoroca foi calculado pelo software ArcGIS® 10.6. Os valores resultados do cálculo do volume estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6. Valores referentes ao cálculo do volume da voçoroca estimado usando dados de RPA e de levantamento topográfico.

Medidas	RPA	Topografia
Plano de referência (m)	1065	1065
Volume (m <sup>3</sup> )	10.630,02	10.370,62
Área (m <sup>2</sup> )	1.225,57	1.380,63
Amplitude Volume (m <sup>3</sup> )	259,39	
Amplitude Volume (%)	2,44	
Amplitude Área (m <sup>2</sup> )	-155,06	

A Figura 28 corresponde à representação 3d da voçoroca a partir do MDT gerado pelos dados da RPA.

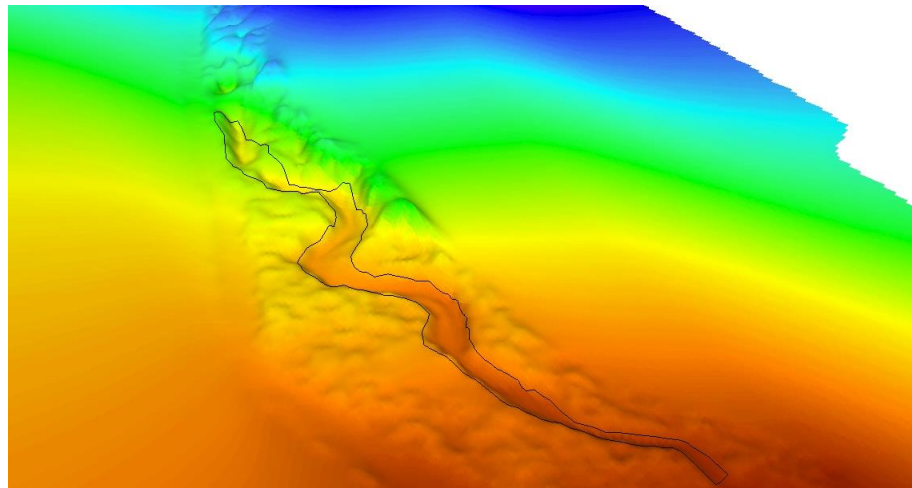


Figura 28. Visualização 3d da voçoroca na área de estudo. Fonte: o autor.

Por fim, os resultados do comparativo de volume dos MDTs da área de estudo apresentaram amplitude volumétrica de 259,39 metros cúbicos esse valor corresponde a 2,44% de discrepância. A diferença volumétrica entre as duas técnicas de levantamento (RPA e Topográfico) ocorreu devido a maior nuvem de pontos gerada pelo MDT derivado de dados adquiridos pelo RPA. Como resultado, o MDT da RPA proporcionou um maior detalhamento da morfologia da voçoroca, permitindo uma estimativa de maior volume comparada com os dados derivados de levantamento topográfico convencional.

Conforme observado na Figura 28, devido ao maior detalhamento da voçoroca o MDT da RPA proporciona melhor visualização dos processos erosivos que ocorrem ao longo e no entorno da mesma, possibilitando melhor planejamento e a tomada de medidas protetivas na área visando reduzir os processos erosivos mais intensos e a recuperação da área erodida mais intensamente.

De forma similar ao estudo de Julian e Nunes (2019), observamos que levantamentos com aeronaves remotamente pilotadas, associadas a ferramentas de geoprocessamento, apresentam-se como uma metodologia simples e adequada para a estimativa de volume de áreas atingidas por processos erosivos intensos.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base nos resultados deste estudo, conclui-se que os produtos cartográficos digitais elaborados a partir de dados da RPA podem ser acuradamente utilizados para a caracterização topográfica e mensuração de voçorocas, com diferenças não significativas comparada com dados derivados de levantamento topográfico convencional.

Observou-se que as RPAs têm grande potencial para aplicação em estudos de erosões hídricas, tratando-se de uma ferramenta capaz de obter diversos dados. Entretanto, sugere-se o ajuste de alguns parâmetros de acordo com a finalidade de cada levantamento, com intuito de produzir maior acurácia nos produtos derivados dos RPAs.

Dessa maneira, recomenda-se a utilização maior número de pontos de controle e de verificação para a modelagem do MDT e do Ortomosaico a partir de dados derivados de RPA. A distribuição desses pontos deve ser dispersa ou aleatória, distribuídos de forma ampla e espacialmente representativa na área de interesse, buscando assim alcançar maior precisão e acurácia nos produtos cartográficos gerados. Tais medidas técnicas contribuirão para reduzir os erros planimétricos e altimétricos (SANTOS et. al, 2016).

Ressalta-se que existem alguns aspectos em campo que causam dificuldades na produção de modelos digitais do terreno e que geram distorções na representação real da superfície. Esses fatores incluem a vegetação densa e o sombreamento de superfícies e, portanto, é fundamental escolher um horário ideal para o mapeamento, com menor influência de sombras e selecionar áreas com solo predominantemente exposto para se alcançar melhores de acurácia nos resultados no mapeamento.

Em síntese, os valores obtidos pelo cálculo do volume dos MDTs demonstram que existem erros absolutos nas seções transversais ao longo da voçoroca do estudo. Entretanto, observou-se que houve baixa discrepância do volume calculado pelas duas formas de levantamento (RPA e Topográfico convencional). Apesar da divergência entre os levantamentos, verificou-se que o uso de dados adquiridos com RPA é eficiente para a mensuração de volume da voçoroca e podem ser aplicados em levantamentos com tal finalidade, observando a precisão requerida em cada projeto ou propósito técnico.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES NETO, Armando. **Geração de trajetórias para veículos aéreos autônomos não-tripulados**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 99 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial: RBCA-E nº 94. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. **Superintendência de Aeronavegabilidade (SAR) / Superintendência de Padrões Operacionais (SPO)**. p. 4-6. Resolução nº 419, 2 de maio de 2017.

AGISOFT. Agisoft Metashape, 2006. **Página Inicial**: Descubra a fotogrametria inteligente com Metashape. Disponível em: <https://www.agisoft.com/>. Acesso em: 21 de novembro de 2020.

BERTOLINI, Dorival; NETO, Francisco Lombardi. Volume I: Embasamento técnico do programa estadual de microbacias hidrográficas. *In*: SÃO PAULO, Governo do Estado de. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **Manual Técnico de Conservação de Solo e Água**. Campinas, 1994. p. 21-42.

BIGARELLA, João José. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. vol. 3. Florianópolis: Editora da UFSC. 1994.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brasília: Subchefia para Assuntos Jurídicos. Presidente da República .Casa Civil, 1984. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-89817-20-junho-1984-439814-norma-pe.html>. Acesso em: 18 de novembro de 2020.

CABRAL, Tiéle Lopes. **Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi–RS**. 2018. Tese de Doutorado. Dissertação (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 191 p.

CARDOSO, Murilo Raphael Dias; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; BARROS, Juliana Ramalho. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40-55, 2014.

CARVALHEDO, Filipe de Paula.; SIQUEIRA, Thiago Marques. **Aplicação do algoritmo TLD para identificação e rastreamento de veículos em imagens capturadas por aeronaves não tripuladas**. 2013. Dissertação (Bacharel em Engenharia Eletrônica) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 72 p.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; CRUZ, E. S.; CEDDIA, M. B.; LANA, Â. M. Q.; Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2001.

COGO, Neroli Pedro; LEVIEN, Renato; SCHWARZ, Ricardo Altair. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

COMANDO DA AERONÁUTICA. Ministério da Defesa. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ICA 100-40 Tráfego aéreo: Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro, publicado no **Boletim do Comando da Aeronáutica nº 095**, p. 9-14, 2 de junho de 2020.

DA CUNHA, Alexandre Aquino *et al.* Controle de Qualidade Posicional de Ortofotogerada pelo RPA (Remotely Piloted Aircraft) Phantom 3 com Receptor GNSS Embarcado. 2016. *In: COBRAC - Congresso de Cadastro Multifinalitário e Gestão Territorial*, Brasil, nov. 2016. Disponível em: <http://www.ocs.cobrac.ufsc.br/index.php/cobrac/cobrac2016/paper/download/221/3>. Acesso em: 29 out 2020.

DA SILVA, Gabriela Mendonça; VIEIRA, Antonio Fábio Sabbá Guimarães. Mapeamento De Voçorocas Na Cidade De Rio Preto Da Eva (Am). **Geosaberes**, ISSN: 2178-0463, Fortaleza, Universidade do Ceará, v. 11, 2020. p. 517-531.

DA SILVA, João Edson Costa Ferreira; BOTELHO, Mosar Faria. Cadastro Ambiental Rural utilizando imagem de drone aerofotogramétrico. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 2, p. 73–84, 2017.

DE AZAMBUJA, José Luiz Fay; MATSUOKA, Marcelo Tomio. Topografia e GPS: Conquista e Desafios. *In: Série em geomática: Volume 01. II Seminário Anual de Pesquisas em Geodésia na UFRGS*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, Porto Alegre, 2007. p. 13–18.

DE SOUSA, Joaquim Vasconcelos Reynolds. **Avaliação em Voo das Características de uma Asa de Envergadura Variável**. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestre em Engenharia Aeronáutica) - Universidade Da Beira Interior, Covilhã, Portugal, junho de 2014.

DJI. DJI - Líder mundial em drones com câmeras/quadrícópteros. 2006. **Página inicial** - Loja. Disponível em: [https://www.dji.com/?from=store\\_top\\_nav](https://www.dji.com/?from=store_top_nav) . Acesso em: 21 de novembro de 2020.

DOBEK, Katarzyna. *et al.* Types of gullies and conditions of their development in silvicultural loess catchment (Szczebrzeszyn Roztocze region , SE Poland ). **Landform Analysis**, Faculty of Earth Science and Spatial Management, Maria Curie-Skłodowska University, Lublin, Poland, Vol. 17. p. 39-42. Setembro de 2011.

DOS SANTOS, Afonso de Paula *et al.* Avaliação Da Acurácia Posicional Em Dados Espaciais Utilizando Técnicas De Estatística Espacial: Proposta De Método E Exemplo Utilizando A Norma Brasileira. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 22, n. 4, p. 630-650, dez. 2016.

DOS SANTOS, Luiz Fernando Bohnenberger. **Avaliação de modelo digital de terreno gerado através de VANT em planícies pantaneiras.** 2016. Monografia. Dissertação (Bacharel em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, setembro de 2016.

EISENBEISS, Henri. **UAV Photogrammetry.** Tese de Doutorado. Dissertação (Doutorado em Ciências) - University of Technology Dresden, Zurich, Switzerland, ETH Zurich Research Collection, p. 236, 2009.

FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin *et al.* Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. **Anais XVI do Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto (SBSR)**, v.16, p. 9308-9315, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013.

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. *et al.* Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 55 - Embrapa**, Rio Branco, Acre, ed. 1, p. 1-41, de dezembro de 2016.

GEOPEC. **GeoPEC:** Software para avaliação da acurácia posicional em dados cartográficos, 2019. Disponível em: <http://www.geopec.com.br/p/software-geopec.html>. Acesso em: 21 de novembro de 2020.

JULIAN, Carolina; NUNES, João Osvaldo Rodrigues. Uso De Vant E Geoprocessamento Para Cálculo De Solo Erodido Em Voçoroca Localizada No Distrito De Amadeu Amaral. Marília/Sp-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia** (online), São Paulo, v. 21, n. 4, p. 835-845, 2019.

KOCI, Jack *et al.* Assessment of UAV and ground-based structure from motion with multi-view stereo photogrammetry in a gullied savanna catchment. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 11, p. 4-23, 30 de outubro de 2017.

KRUEGER, Cláudia Pereira. **Posicionamento por satélites: Métodos de Posicionamento**. Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, v.6, 2011.

LIMA, Herlander Mata. **Introdução à Modelação Ambiental: Erosão Hídrica**. Instituto Latino Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Centro de Recursos Naturais e Ambientais, Funchal, Lisboa, Portugal, 2010.

LONGHITANO, George Alfredo. **Vants para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes: Geoprocessamento) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Setembro de 2010, p. 1-163.

LOPES, Thiago. **Avaliação do uso de RPA quadrimotor para aplicações de mapeamento**. 2019. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, p. 1-128.

MAGALHÃES, Ricardo Aguiar. Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle. **VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. v. 3, Goiânia, GO, 03 a 06 de maio de 2001.

MCCUEN, Richard; KNIGHT, Zachary; CUTTER, Gillian. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. **Journal of Hydrologic Engineering**, jornal online, v. 11, n. 6, p. 597–602, 2006.

MONDARDO, Marcos Leandro. Uma proposta prática para a representação de uma bacia hidrográfica através de um modelo digital do terreno. **Caminhos de Geografia**, revista online, v.8, n. 21, p. 1–7, junho de 2007.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentações e Aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2008. v. 1. 476p. 2.ed.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transitions of the American Society Agriculture & Biology engineers**, St. Joseph, n. 50, p. 885-900, 2007.

NAMIKAWA, Laércio Massaru. *et al.* **Modelagem Numérica de Terreno e Aplicações: Capítulo 1 - Introdução a Modelagem Digital de Terrenos**. São José dos Campos, SP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-9900-PUD/129), 2003.

NASH, J. Eamonn; SUTCLIFFE, Jonh V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1 - A discussion of principles. **Journal of hydrology**, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282-290, abril de 1970.

PAEZ, Doris Rakael Monteiro. **Utilização do lodo de esgoto na produção de mudas e no cultivo do Eucalipto**. 2011. Monografia. Dissertação (Título de Engenheiro Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, novembro de 2011, p. 4-41.

POLEZEL, Wesley Gildo Canducci. **Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no posicionamento**. 2010. Tese de Mestrado. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, SP, p. 4-107.

REATTO, Adriana *et al.* **Mapa Pedológico Digital - SIG: Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e Uma Síntese do Texto Explicativo**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Documentos Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, Planaltina, DF, ed. 1, n. 120, p.5-29, junho 2004.

RENNER, Leonardo Cardoso *et al.* Desenvolvimento e montagem de VANT de asa fixa de baixo custo para suprir a demanda de ensino e pesquisa nas áreas de Geociências. **Terrae Didática**, Campinas, SP, v. 16, n. e020002, p. 1-12, 2020.

RIBEIRO, José Felipe; WALTER, Bruno Machado Teles. As principais fitofisionomias do Biomas Cerrado. **Cerrado: ecologia e flora**, v. 1, p. 152–212. Embrapa Cerrados/Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF, 2008.

ROBERTO, Arcádio Joaquim. **Extração de Informação Geográfica a partir de Fotografias Aéreas obtidas com VANTs para apoio a um SIG Municipal**. 2013. Tese de Mestrado. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, p. 5-108.

SANTOS, Suzana Daniela Rocha *et al.* Considerações sobre a utilização do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nos dias atuais. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, PE, 27 a 30 de julho de 2010. p. 001-005.

SANTOS, Glenio G.; GRIEBELER, Nori P.; OLIVEIRA, Luiz F. C. de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, 2010. p. 115-123.

SOARES, Paula *et al.* A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados no inventário florestal-o caso do montado de sobro. **VIII CNCG Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia**, 29 e 30 de outubro 2015. p. 1-8.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia *et al.* Fotogrametria: aplicações a curta distância. *In*: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. **FCT: 40 anos**, Perfil Científico-Educacional, v.40, Presidente Prudente, SP, 1999. p. 147–159.



TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente, Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), 2009. Disponível em: [http://www.faed.udesc.br/arquivos/id\\_submenu/891/introducao\\_a\\_fotogrametria.pdf](http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf). Acesso em: 29 de outubro de 2020.

TOPOMAP. Topomap, 2008. **Página inicial: Gnss/GPS RTK**. Disponível em: <http://topomap.com.br/index.php>. Acesso em: 21 de novembro de 2020.

VIANA, Diogenes Carvalho. **Análise da qualidade cartográfica de mds e mde gerados por VANT e refinados com uso de dados GNSS RTK**. 2017. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, dezembro de 2017, p. 10-69.

VIEIRA, Antonio Fabio Guimarães. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): Principais fatores controladores e Impactos urbano-ambientais**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação (Doutor em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SP, dezembro de 2008, p. 20-310.

WHITEHEAD, Ken *et al.* Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 02, n. 03, p. 86–102, 2014.

XMOBOTS. Xrobots, 2007. **Arator 5b**. Disponível em: <https://xrobots.com.br/arator-5b/>. Acesso em: 21 de novembro de 2020.

ZANETTI, Juliette *et al.* Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por vant. **Revista Brasileira de Cartografia**, Viçosa, v. 69, n. 2, 2016. p. 263-277.

ZONTA, João Henrique *et al.* Práticas de Conservação de Solo e Água. *In: Circular Técnica 133*. Embrapa, ISSN 0100-6460, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Campina Grande, PB, 2012.

## 7. APÊNDICE A: RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



Foto 8. Equipe que participou do levantamento de campo.



Foto 9. Árvore caída em meio a Voçoroca.



Foto 10. Entulho jogado dentro da Voçoroca.



Foto 11. Visada da Voçoroca.



Foto 12. Visão aérea da Voçoroca.

**8. APÊNDICE B: RELATÓRIO DO PROCESSAMENTO DO  
AEROLEVANTAMENTO REALIZADO EM 11 /08/2020**

**EROSÃO TCC**

**RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO**

**11 August 2020**



## Survey Data

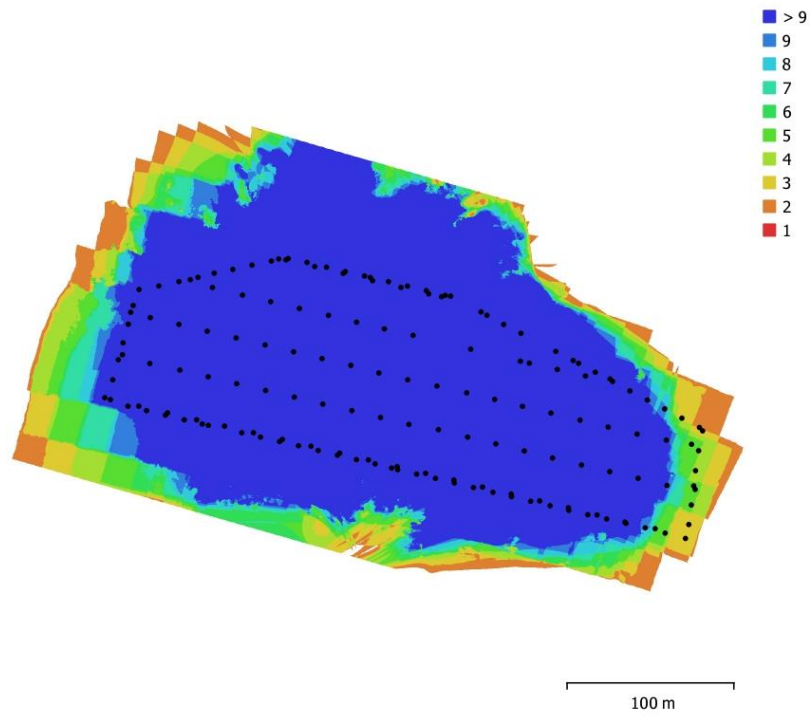


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	161	Camera stations:	161
Flying altitude:	92.1 m	Tie points:	166,618
Ground resolution:	2.34 cm/pix	Projections:	406,476
Coverage area:	0.0801 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.491 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	4864 x 3648	8.8 mm	2.61 x 2.61 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

## Camera Calibration

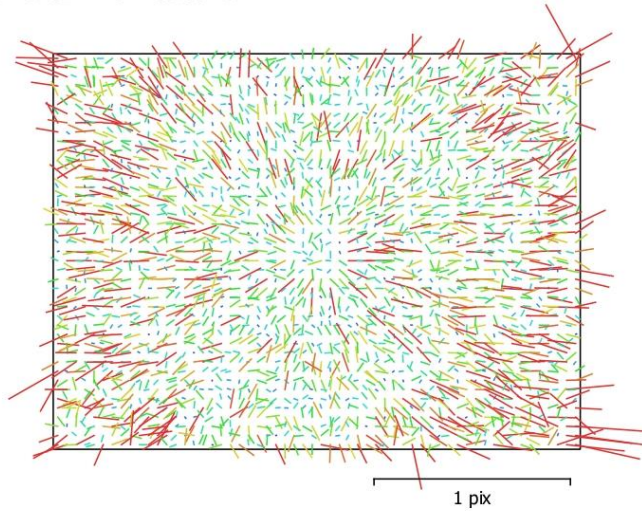


Fig. 2. Image residuals for FC6310 (8.8mm).

### FC6310 (8.8mm)

161 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>4864 x 3648</b>	<b>8.8 mm</b>	<b>2.61 x 2.61 <math>\mu\text{m}</math></b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>3653.7</b>	0.49	1.00	-0.02	-0.66	-0.18	0.03	-0.01	0.04	-0.01	0.01	-0.23
<b>Cx</b>	<b>-17.3144</b>	0.3		1.00	0.05	0.11	0.53	0.04	-0.04	0.03	0.70	0.09
<b>Cy</b>	<b>23.4059</b>	0.39			1.00	-0.20	0.00	-0.03	-0.02	0.01	0.08	0.58
<b>B1</b>	<b>0.270238</b>	0.11				1.00	0.01	-0.05	0.02	-0.02	-0.05	0.00
<b>B2</b>	<b>-1.28837</b>	0.1					1.00	0.03	-0.04	0.02	0.11	0.05
<b>K1</b>	<b>0.00901455</b>	0.0002						1.00	-0.93	0.85	-0.01	-0.11
<b>K2</b>	<b>-0.0300604</b>	0.00076							1.00	-0.97	-0.02	0.00
<b>K3</b>	<b>0.0299748</b>	0.00088								1.00	0.03	-0.00
<b>P1</b>	<b>0.000235426</b>	2e-05									1.00	0.11
<b>P2</b>	<b>0.000568521</b>	2.4e-05										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

## Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.  
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.  
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
3.1872	1.46143	27.5452	3.50629	27.7675

Table 3. Average camera location error.  
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.



# Ground Control Points

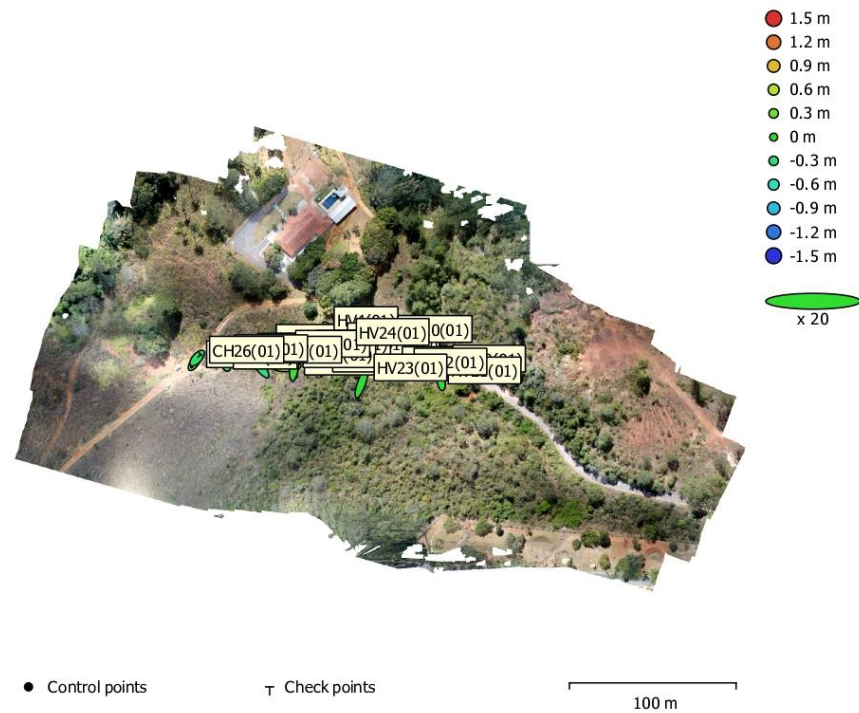


Fig. 4. GCP locations and error estimates.  
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.  
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
19	28.6252	31.5995	41.9937	42.6372	59.8448

Table 4. Control points RMSE.  
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	23.121	32.0333	43.4062	39.5059	58.6925

Table 5. Check points RMSE.  
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
HV1(01)	-17.749	-25.7488	9.17482	32.5915	0.539 (27)
HV2(01)	18.3392	15.9699	30.1272	38.717	0.738 (36)
HV3(01)	-33.3943	10.3153	-32.1032	47.4574	0.754 (32)
HV4(01)	34.9776	-40.6322	-0.506184	53.6159	0.814 (50)
HV5(01)	41.0376	4.76915	-15.5026	44.1266	0.534 (48)
HV7(01)	-5.06742	17.4538	-17.0139	24.8955	0.687 (27)
HV8(01)	-32.2555	-43.5038	20.1484	57.7837	0.612 (29)
HV9(01)	-6.59075	-46.7807	-22.577	52.3602	0.435 (49)
HV10(01)	56.2994	2.66781	34.6738	66.1741	0.629 (53)
HV12(01)	1.3972	19.3393	40.5423	44.9404	0.489 (49)
HV13(01)	-35.4089	-37.2754	34.3492	61.8313	0.470 (57)
HV15(01)	7.30924	54.2939	8.06049	55.3735	0.491 (50)
HV17(01)	-52.214	-15.1433	20.9108	58.2484	0.498 (35)
HV19(01)	-18.3867	6.58964	80.3949	82.7335	0.631 (42)
HV21(01)	-5.87465	32.6188	-2.75372	33.2578	0.522 (36)
HV22(01)	31.5039	-24.8741	-130.131	136.181	0.851 (46)
HV23(01)	23.3968	66.2173	-4.48906	70.3725	0.472 (42)
HV24(01)	-21.5635	-18.4152	-8.58055	29.6264	0.619 (66)
HV25(01)	14.2309	22.148	-44.8419	51.9985	0.560 (36)
<b>Total</b>	<b>28.6252</b>	<b>31.5995</b>	<b>41.9937</b>	<b>59.8448</b>	<b>0.606</b>

Table 6. Control points.  
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
CH6(01)	-47.4084	65.3766	-35.4161	88.1814	0.510 (33)
CH11(01)	-2.26492	32.6079	-37.1023	49.4468	0.459 (63)
CH14(01)	-9.74963	-35.6022	18.6577	41.3604	0.492 (59)
CH16(01)	-6.72333	-2.56666	-6.13467	9.45648	0.546 (40)
CH18(01)	30.3176	-0.670595	24.3015	38.8609	0.542 (41)
CH20(01)	-0.211071	-7.3296	-95.0647	95.347	0.702 (52)
CH26(01)	20.7347	22.7437	-23.3283	38.6188	0.464 (28)

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
<b>Total</b>	<b>23.121</b>	<b>32.0333</b>	<b>43.4062</b>	<b>58.6925</b>	<b>0.539</b>

Table 7. Check points.  
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

# Digital Elevation Model

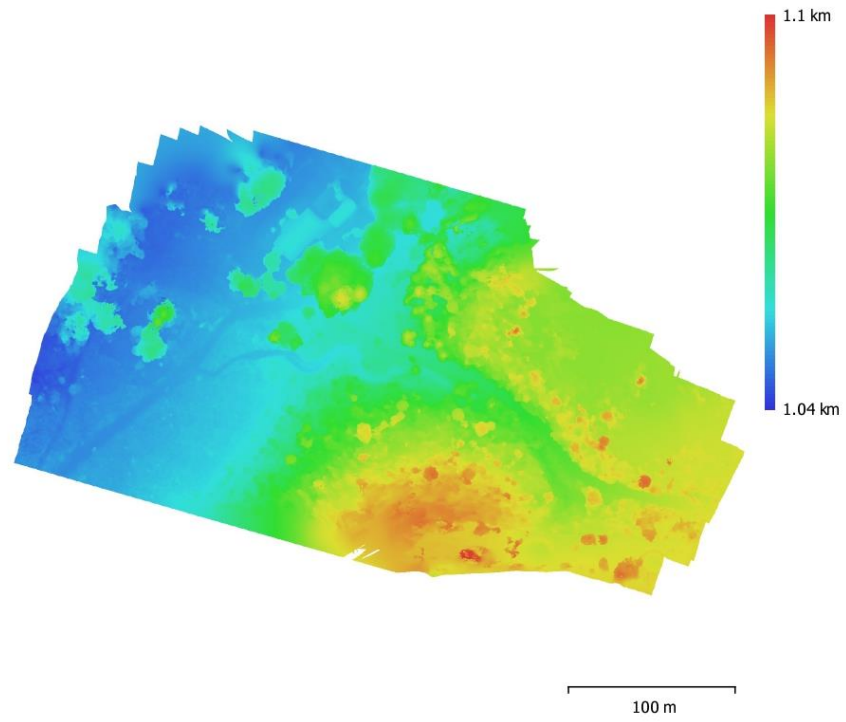


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 9.38 cm/pix  
Point density: 114 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

<b>General</b>	
Cameras	161
Aligned cameras	161
Markers	26
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
<b>Point Cloud</b>	
Points	166,618 of 204,820
RMS reprojection error	0.125599 (0.491035 pix)
Max reprojection error	0.944514 (13.2111 pix)
Mean key point size	3.49151 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	2.79715
<b>Alignment parameters</b>	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Filter points by mask	Yes
Mask tie points	No
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	59 minutes 53 seconds
Matching memory usage	257.46 MB
Alignment time	3 minutes 9 seconds
Alignment memory usage	68.34 MB
<b>Optimization parameters</b>	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	3 seconds
Software version	1.6.2.10247
<b>Depth Maps</b>	
Count	161
<b>Depth maps generation parameters</b>	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	24 minutes 49 seconds
Software version	1.6.2.10247
<b>Dense Point Cloud</b>	
Points	16,676,786
Point colors	3 bands, uint8
<b>Depth maps generation parameters</b>	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	24 minutes 49 seconds
<b>Dense cloud generation parameters</b>	
Processing time	1 hours 5 minutes
Software version	1.6.2.10247

<b>Model</b>	
Faces	3,312,865
Vertices	1,658,433
Vertex colors	3 bands, uint8
<b>Depth maps generation parameters</b>	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	24 minutes 49 seconds
<b>Reconstruction parameters</b>	
Surface type	Height field
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Strict volumetric masks	No
Processing time	1 minutes 8 seconds
Software version	1.6.2.10247
<b>DEM</b>	
Size	5,304 x 3,722
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)
<b>Reconstruction parameters</b>	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	36 seconds
Software version	1.6.2.10247
<b>Orthomosaic</b>	
Size	18,719 x 12,043
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)
Colors	3 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Processing time	16 minutes 22 seconds
Software version	1.6.2.10247
<b>System</b>	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.2 build 10247
OS	Windows 64 bit
RAM	7.88 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz
GPU(s)	GeForce 940MX