

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL–PPEC
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: INFORMAÇÕES ESPACIAIS

**AVALIAÇÃO DE EROSÃO POR IMAGENS A CURTA
DISTÂNCIA.**

Alexandre Aquino da Cunha

Salvador
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL–PPEC
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: INFORMAÇÕES ESPACIAIS

AVALIAÇÃO DE EROÇÃO POR IMAGENS A CURTA DISTÂNCIA.

Alexandre Aquino da Cunha

Dissertação apresentada ao **PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**
como requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Prof. Dr. Mauro José Alixandrini Jr.

Coorientadora: Profa. Dra. Vivian de Oliveira Fernandes

Agência Financiadora: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e
Tecnológico (CNPq)

Salvador
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Aquino da Cunha, Alexandre
Avaliação de Erosão por Imagens a Curta Distância /
Alexandre Aquino da Cunha. -- Salvador, 2018.
115 f. : il

Orientador: Mauro José Alixandrini Junior.
Coorientadora: Vivian de Oliveira Fernandes.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em
Engenharia Civil) -- Universidade Federal da Bahia,
Escola Politécnica, 2018.

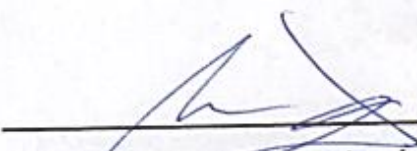
1. Aerofotogrametria. 2. VANT. 3. ARP. 4. Erosão.
I. José Alixandrini Junior, Mauro. II. de Oliveira
Fernandes, Vivian . III. Título.

DEDICATÓRIA

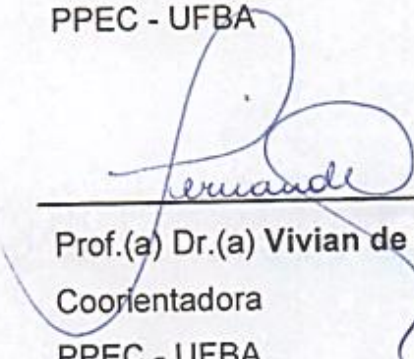
“Aos meus familiares”

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALEXANDRE AQUINO DA CUNHA APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 28 DE MAIO DE 2018.

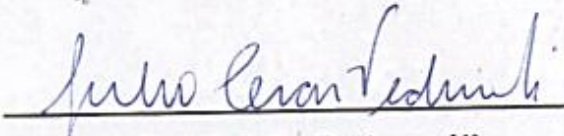
BANCA EXAMINADORA



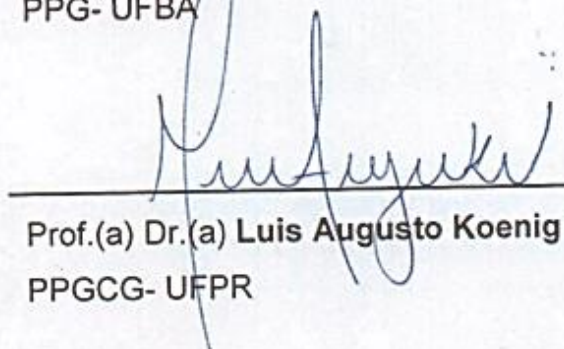
Prof.(a) Dr.(a) **Mauro José Alixandrini Junior**
Orientador
PPEC - UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Vivian de Oliveira Fernandes**
Coorientadora
PPEC - UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Julio Pedrassóli**
PPG- UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Luis Augusto Koenig Veiga**
PPGCG- UFPR

FORMAÇÃO DO CANDIDATO

Engenheiro Agrimensor e Cartógrafo, formado pela Universidade Federal da Bahia,
UFBA (2015)

“Medicina, lei, negócios e engenharia são ocupações nobres para manter a vida. Mas poesia, beleza, romance e amor são razões para ficar vivo.”

***Robin Williams em Sociedade dos Poetas
Mortos***

AGRADECIMENTOS

Agradecer é o caminho mais curto para demonstrar a importância das pessoas que nos ajudam a ser feliz. Sendo assim quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram em minha formação pessoal e profissional.

À minha mãe Neuza Aquino por tudo o que ela sempre fez por mim.

Ao meu pai, Jayme Mascarenhas (*in memoriam*), que apesar de não estar aqui, me fortaleceu durante o tempo que viveu comigo, e isso foi muito importante.

A minha namorada Beatriz Medeiros, que caminhou ao meu lado, me dando todo apoio nessa trajetória de estudos e pesquisa. Sem ela não conseguiria chegar onde cheguei.

Aos meus eternos orientadores, Prof^a. Dra. Vivian de Oliveira Fernandes e Prof. Dr. Mauro José Aليxandrini Jr., pelas suas disponibilidades e incentivo que foram de extrema importância para conseguir finalizar este trabalho. Prestaram apoio incondicional, trabalhando lado a lado, juntos nesta minha caminhada. Fortaleceram meu trabalho através de críticas construtivas, reflexões e discussões, e foram fundamentais ao longo de todo percurso, e com certeza vão continuar presentes em minha vida.

Ao funcionário Leandro do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia pela dedicação, atenção e amizade.

Aos amigos Iuri Martins e Elias Naim, que fizeram parte da minha formação, me ajudaram de forma exaustiva, e para eles, serei eternamente grato.

A todos os professores e funcionários do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da UFBA que me apoiaram nessa caminhada, em especial ao professor Julio César Pedrassoli por todo apoio e dedicação a minha pessoa.

Enfim, a todos que de forma direta e indireta me auxiliaram a concluir mais esse passo em minha vida.

CUNHA, A. A.; **Avaliação de erosão por imagens a curta distância**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Mestrado em Engenharia Civil. Salvador, Bahia, 2018.

RESUMO

Os solos são um recurso estratégico, não renovável, de alta importância social, econômica e ambiental, e sua erosão superficial representa um significativo problema. O estudo deste fenômeno exige medições precisas da superfície do solo. A fotogrametria digital é proposta neste trabalho como uma técnica eficaz para tais medições, no contexto da escala do estudo experimental. Este projeto de pesquisa tem como objetivo a proposição de um estudo acerca da avaliação do potencial do veículo aéreo não tripulado (VANT) ou Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), também conhecida como RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), como plataforma na obtenção de dados para monitoramento de erosão, através da elaboração de uma metodologia para monitorar processos erosivos oriundos de ravinas e voçorocas, com geração de ortofoto e um modelo digital de elevação, proporcionando condições de se executar medidas precisas de parâmetros de comprimento, área e volume para a quantificação do processo erosivo. Devido ao crescente interesse em monitorar regiões propícias à erosão, existe uma demanda crescente de utilização RPA, dado seu rápido e eficiente método de levantamento que combina a aquisição de dados com informações adicionais, como imagens orbitais e/ou terrestres, ortoimagens e modelos digitais de elevação. Os métodos empregados no estudo desta dissertação mostraram-se promissores para o monitoramento da erosão e fortalece o uso do RPA como plataforma de medição. Na primeira área de estudo foram aplicados testes em uma região de morro, para cálculo de volume positivo, e foram utilizados pontos de apoio e sinalização de marcações no solo. Com isso o valor de volume obtido com o uso de VANT obteve valores finais próximos dos valores de referência, com uso de estação total. Assim, pode-se dizer que a utilização de marcações no solo, para auxiliar na correlação de imagens, foi uma técnica que favoreceu para melhores resultados nos testes propostos para avaliar o potencial do VANT nesta situação. No levantamento com o VANT na segunda região de estudo, onde se aplicou testes em uma área de ravina, para o cálculo de volume negativo, observou-se que ocorreu uma diminuição da densidade na nuvem de pontos devido a oclusão de algumas áreas interiores da ravina, resultando em respostas aleatórias do produto final obtidos do VANT, ocasionando altas discrepâncias de volume nas comparações com os valores de referência Não sendo, assim, recomendado o uso do VANT nas situações semelhantes aos testes aplicados nesta região.

Palavras-chave: Aerofotogrametria. VANT. ARP. Erosão

CUNHA, A. A.; **Avaliação de erosão por imagens a curta distância**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Mestrado em Engenharia Civil. Salvador, Bahia, 2017.

ABSTRACT

Soils are a strategic resource, nonrenewable, of high social, economic and environmental importance, and its superficial erosion represents a significant problem. The study of this phenomenon requires accurate measurements of the soil surface. Digital photogrammetry is proposed in this work as an effective technique for such measurements, in the context of the scale of the experimental study. This research project has the objective of proposing a study on the evaluation of the potential of the unmanned aerial vehicle (UAV) or Remotely Piloted Aircraft (RPA), also known as RPA (Remotely Piloted Aircraft), as a platform to obtain data for erosion monitoring, through the elaboration of a methodology to monitor erosive processes from ravines and gullies, with orthophoto generation and a digital elevation model, providing conditions to execute precise measurements of length, area and volume parameters for the quantification of erosive process. Due to the growing interest in monitoring regions prone to erosion, there is a growing demand for RPA utilization, given its rapid and efficient survey method that combines the acquisition of data with additional information such as orbital and / or terrestrial images, orthoimaging, and digital models of elevation. The methods used in the study of this dissertation have shown promise for the monitoring of erosion and strengthens the use of RPA as a measurement platform. In the first area of study, tests were applied in a hill region for the calculation of positive volume, and ground control points and marking were used in the soil. Thus, the volume value obtained with the use of VANT obtained final values close to the reference values, with total station use. Thus, it can be said that the use of markings in the soil, to aid in the correlation of images, was a technique that favored for better results in the tests proposed to evaluate the potential of the UAV in this situation. In the survey with the UAV in the second study region, where tests were applied in a ravine area, for the calculation of negative volume, it was observed that there was a decrease in the density in the cloud of points due to the occlusion of some interior areas of the ravine, resulting in random responses of the final product obtained from the UAV, causing high volume discrepancies in the comparisons with the reference values. Therefore, the use of UAV in situations similar to the tests applied in this region is not recommended.

Keywords: Aerophotography. UAV. RPA. Erosion

SUMÁRIO

	Pág.
BANCA EXAMINADORA	v
AGRADECIMENTOS.....	vii
RESUMO	ii
ABSTRACT	ix
SUMÁRIO	x
ÍNDICE DE QUADROS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipótese	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Erosão	4
2.1.1 <i>Definição.....</i>	<i>5</i>
2.1.2 <i>Monitoramento de erosão de solo.....</i>	<i>12</i>
2.1.3 <i>Tipos de solo.....</i>	<i>13</i>
2.1.4 <i>Erosão do tipo ravina.....</i>	<i>22</i>
2.1.5 <i>Erosão do tipo voçoroca.....</i>	<i>24</i>
2.2 Fotogrametria	25
2.2.1 <i>Processo Fotogramétrico.....</i>	<i>29</i>
2.2.1.1 <i>Orientação Interior</i>	<i>29</i>
2.2.1.2 <i>Orientação Exterior.....</i>	<i>30</i>
2.2.1.3 <i>Ressecção Espacial.....</i>	<i>31</i>
2.2.1.4 <i>Interseção Espacial.....</i>	<i>32</i>
2.2.1.5 <i>Fototriângulação</i>	<i>33</i>
2.3 Vant para fins Fotogramétricos	35
2.3.1 <i>Mapeamento com VANT.....</i>	<i>35</i>

2.3.2	<i>Pontos de controle</i>	36
2.3.3	<i>Modelo Digital do Terreno</i>	37
2.3.4	<i>Ortofotocarta Digital</i>	39
2.3.5	<i>Structure from Motion (SfM)</i>	43
2.3.6	<i>Regulamentação Brasileira para voos não tripulados</i>	44
3	ÁREA DE ESTUDO	49
3.1	Caracterização da Área de Estudo	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	Material	51
4.2	Métodos	51
4.2.1	<i>Cálculo de volume utilizando distanciômetro</i>	54
4.2.2	<i>Cálculo de volume utilizando aeronave com sensor embarcado</i>	56
4.2.3	<i>Execução de voo e processamento</i>	57
5	RESULTADOS E ANÁLISES	60
5.1	Região de Estudo 1	60
5.2	Região de Estudo 2	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICES	81
	Apêndice A - Parâmetros de Processamento, Região 1 (Voo 40m)	81
	Apêndice B - Parâmetros de Processamento, Região 1 (Voo 80m)	83
	Apêndice C - Parâmetros de Processamento, Região 1 (Voo 120m).....	85
	Apêndice D - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 1 - Voo 40m)	87
	Apêndice E - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 1 - Voo 60m).....	89
	Apêndice F - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 1 - Voo 80m).....	91
	Apêndice G - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 1 - Voo 100m)	93
	Apêndice H - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 2 - Voo SB70).....	95
	Apêndice I - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 2 - Voo SB80)	97
	Apêndice J - Parâmetros de Processamento, Região 2 (Morro 2 - Voo SB90)	99

ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1: Efeito do comprimento de rampa nas perdas de solo	10
Quadro2: Classes de relevo	10
Quadro3: Perdas de solos sob diferentes coberturas vegetais.....	12
Quadro4: Classificação dos solos brasileiros	20
Quadro 5: Definições de “ravina” na literatura	22
Quadro 6: Variação percentualdo cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, a 40m de altura e sem marcação e pontos de controle em solo	61
Quadro 7: Variação percentualdo cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, com voo duplo, a 40m de altura e marcação e pontos de controle em solo	61
Quadro 8: Variação percentualdo cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, com voo simples, a 40m de altura e marcação e pontos de controle em solo	62
Quadro 9: Variação percentual do cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, com voo simples, a 40m, 80m e 120m de altura e marcação e pontos de controle em solo	63
Quadro 10: Análise estatística da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 1, Praça das Artes	64
Quadro 11: Análise estatística da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 2, MORRO 1	71
Quadro 12: Análise estatística da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 2, MORRO 2.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Fatores de formação do solo	5
Figura 02: A paisagem e os fatores responsáveis pela formação do solo.	5
Figura 03: Solos com textura arenosa e média derivados de arenitos, são facilmente erodíveis, como no caso, a erosão em voçoroca	7
Figura 04: Solo com argila de atividade alta, formando torrões que se desprendem facilmente do talude, em razão da movimentação das argilas expansíveis (esmectitas)	8
Figura 05: Frente de tabuleiro. O relevo forte ondulado da encosta (declive entre 20 e 45%) e o talude praticamente vertical favorecem a erosão	11
Figura 06: A presença de florestas, mesmo em estágio intermediário de regeneração, protege o solo contra a ação erosiva.....	11
Figura 07: Desbarrancamento e exposição de argissolo vermelho-amarelo em taludes sub-verticais, próximo a Catu, Bahia	15
Figura 08: Detalhe da Figura	15
Figura 09: Área de relevo montanhoso e forte ondulado	16
Figura 10: Talude sub-vertical em faixa.....	17
Figura 11: Áreas de Vertissolo, com inclinação de postes, em parte devido ao movimento do solo.	19
Figura 12: Detalhe da inclinação de postes, em parte devido ao movimento do solo ..	19
Figura 13: Solos de mangue	20
Figura 14: Trabalhos de colocação de dutos sobre esses solos.....	20
Figura 15: Representação da Ravina	23
Figura 16: Ângulos de atitude do avião ϕ, ω, κ	30
Figura 17: Cálculo da interseção espacial	33
Figura 18: Imagens fotográficas e seus feixes perspectivos.....	34

Figura 19: Ilustração do processo da ortoretificação de imagens	40
Figura 20: Ilustração do processo de geração da ortofoto digital.....	41
Figura 21: Localização da região de estudo	49
Figura 22: Localização da região de estudo 1	50
Figura 23: Localização da região de estudo 2	50
Figura 24: Fluxograma dos métodos empregados no presente trabalho	52
Figura 25: Fluxograma sequenciando testes aplicados na execução dos voos.	52
Figura 26: Ortofoto georreferenciada da região de estudo 1	53
Figura 27: Ortofoto georreferenciada da região de estudo 2	54
Figura 28: Ilustração da estação total na região de estudo 2.....	55
Figura 29: Fluxogramado planejamento de voo empregado no presente trabalho.....	57
Figura 30: Ilustração exemplificando o plano de voo de grade simples (a) e grade dupla (b).....	57
Figura 31: Ilustração demonstrando a posição da câmera nas tomadas das fotos verticais.....	58
Figura 32: Fluxograma sequenciando o processamento dos dados	59
Figura 33: Malha triangular, resultante do levantamento com estação total, da região de estudo 1	60
Figura 34: Fluxograma de geoprocessamento para cálculo de área e volume..	65
Figura 35: – Modelo digital para extração de dados de referência – Estação Total (Morro 1 e 2)	66
Figura 36: Modelo digital extraído do VANT para análise de discrepância – (Morro 1)	59
Figura 37: – Modelo digital extraído do VANT para análise de discrepância – (Morro 2)	67
Figura 38: Análise da diferença de intensidade de pixel – Blocos (MORRO 1).....	69
Figura 39: Análise da diferença de intensidade de pixel – Blocos (MORRO 2).....	70

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ARP	AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA
CAPES	COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR
CTA	CENTRO TECNOLÓGICO AEROESPACIAL
GSD	<i>GROUND SAMPLE DISTANCE</i>
GNSS	<i>GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM</i>
IAC	INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS
IPTU	IMPOSTO TERRITORIAL URBANO
ITBI	IMPOSTO SOBRE TRANSMISSÃO DE BENS IMÓVEIS
LIDAR	LIGHT DETECTION AND RANGING
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
PEC - PCD	PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA PARA PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS
PRADs	PLANOS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADAS
RPA	<i>REMOTELY PILOTED AIRCRAFT</i>
SIFT	<i>SCALE INVARIANT FEATURE TRANSFORM</i>
SIG	SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICAS
VANT	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO
UAV	<i>UNMANNED AERIAL VEHICLE</i>
UFBA	UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

1 INTRODUÇÃO

A erosão superficial do solo representa um significativo problema ambiental. O estudo do fenômeno exige medições precisas da superfície do solo. A erosão, entendida como um processo de degradação do solo devido à atuação dos fatores naturais e antrópicos, tem cada vez mais merecido a atenção dos pesquisadores. A fotogrametria digital através da utilização de imagens a curta distância é proposta neste trabalho como uma técnica útil para tais medições. Os recursos tecnológicos disponíveis à cartografia têm viabilizado avanços consideravelmente importantes, principalmente através dos softwares e equipamentos que permitem velocidade na obtenção de dados, na troca de informações espaciais e em sofisticadas análises dos fenômenos espaciais, SANTOS & SEGANTINE (2006, p. 1). Paralelamente, o avanço tecnológico no que diz respeito às câmeras aéreas e aos sistemas de navegação, em conjunto com a necessidade de redução de tempo nos processos de mapeamento, fez surgir novos sistemas de aquisição de imagens aéreas, que é o caso do veículo aéreo não tripulado (VANT). Portanto, o intuito deste trabalho é fazer uso do VANT, que é uma plataforma de carga de um geossensor para obtenção de dados espaciais, como um processo metodológico de mapeamento do uso do solo, verificando-se a viabilidade e qualidade de suas informações no monitoramento de processos erosivos. A principal hipótese levantada é que a caracterização de processos erosivos a partir de imagens ortorretificadas e modelos digitais de elevação gerados por aeronaves remotamente pilotadas (RPA) possuem eficiência métrica do que métodos convencionais de topografia, uma vez que, permite-se com que os resultados sejam obtidos de forma mais rápida.

As tentativas de automatização do processamento de dados com características espaciais se iniciaram em meados dos anos 50, na Inglaterra e nos Estados Unidos, com objetivo principal de reduzir os custos de produção e manutenção dos mapas. Entretanto, dada a precariedade da informática e a capacidade de armazenamento e processamento destes sistemas ainda não se poderia classificá-los como sistemas de informação (CÂMARA et al. 2001).

De acordo Silva (2006), as primeiras aplicações utilizando ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ocorreram nos anos 60 do século XX, onde se buscavam alternativas para solucionar problemas relacionados ao gerenciamento de dados espaciais relacionados ao uso da terra em relação a utilização de recursos naturais e por meio de análises ambientais. Contudo, somente nos anos 80 deste mesmo século, com a popularização e barateamento das estações computacionais de trabalho, bem como com a evolução dos

computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados que o uso dos SIGs foi difundido e ampliado. Neste contexto, também durante a mesma década, ocorreram os primeiros relatos de desenvolvimento dos RPA's em território nacional, através do Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) e do projeto Acauã (1984 - 1988), em São José dos Campos (JORGE et al., 2011).

Essa dissertação apresenta a aplicabilidade do sensoriamento remoto por imagens a curta distância para auxílio na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por erosão. Para isso, será realizada a parametrização de técnicas de levantamento com VANT mais adequadas para viabilizar a aplicação e análise da evolução de processos erosivos.

O objetivo principal deste trabalho foi elaborar uma metodologia que possibilite melhores resultados na obtenção de dados utilizando o sensor embarcado na plataforma VANT, que possibilite monitorar processos erosivos. Para isso buscou-se obter valores de parâmetros que caracterizam o processo de erosão, como volume e área, através de imagens a curta distância, utilizando a plataforma VANT para coleta de dados. Foi validada a potencialidade da utilização das fotografias aéreas obtidas por VANT, principalmente a importância e a viabilidade de se obter produtos cartográficos ricos em detalhes para escala utilizada (curta distância), que podem ser utilizados para o monitoramento de processos erosivos. Dessa forma, torna-se necessário mais estudos utilizando o RPA como plataforma de obtenção de dados para estudos no monitoramento de erosão, dado seu baixo custo e a possibilidade de acoplamento de câmeras com resoluções propícias a gerar produtos com melhores acurácias.

A aplicação deste estudo servirá de base para pesquisas posteriores e extensíveis a situações semelhantes em outras regiões, e será importante para o desenvolvimento dos estudos presentes e futuros. Os dados serão disponibilizados de forma digital, e de fácil manipulação. Entre as principais aplicações podemos citar:

- Suporte aos trabalhos de planejamento e de campo;
- Suporte à visualização das informações geradas pela plataforma;
- Facilidade no desenvolvimento, manutenção e alteração de mapas e de outras informações geográficas;
- Geração de mapas e de outras informações para suporte aos PRADs (Planos de Recuperação de Áreas Degradadas);
- Melhor organização das informações coletadas para os estudos e facilidade de acesso às informações para uso, alteração e ou reinterpretação;
- Armazenamento de grandes quantidades de informações vetoriais e raster.

1.1 Hipótese

A caracterização de processos erosivos a partir de imagens ortorretificadas e modelos digitais de elevação gerados pelos dados provenientes do sensor embarcado em aeronave remotamente pilotada possuem eficiência superior a métodos utilizando técnicas convencionais de mapeamento topográfico, como o distanciômetro (estação total).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia para monitorar processos erosivos de ravinamento com o uso de processamento de imagens tomadas a curta distância por VANT.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Delimitar quais processos erosivos podem ser monitorados por imagens;
- b) Verificar a aplicabilidade do sensoriamento remoto por imagens a curta distância para auxílio na avaliação e monitoramento de erosão;
- c) Parametrização de técnicas de levantamento com VANT e fotogrametria terrestre mais adequados para viabilizar a aplicação e análise da evolução de processos erosivos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. No capítulo 1, introdução, é apresentado o tema proposto, com as potencialidades da utilização das fotografias aéreas obtidas por VANT, na geração de produtos a partir dos quais seja possível extrair parâmetros que caracterizem a erosão. O capítulo 2 se refere a revisão da literatura, nele estão expostos conceitos acerca dos temas abordados nesta pesquisa. É dissertado sobre erosão, levantamento geodésico e fotogrametria – VANT. O capítulo 3 disserta sobre a área de estudo, o morro localizado no Campus da Universidade Federal da Bahia, indicando sua localização e suas características. O capítulo 4 apresenta os materiais utilizados para desenvolvimento desta pesquisa, bem como a metodologia de trabalho executada. No capítulo 5 serão divulgados os resultados e discussões dos métodos aplicados. E no capítulo 6 finaliza com as conclusões e recomendações.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Com o objetivo de identificar estudos internacionais, com maior fator de impacto, relacionados com fotogrametria aplicada, foi realizado um estudo bibliométrico, de 2005 a 2017, em periódicos científicos com o intuito de analisar a produção científica dos autores com maior fator de contribuição.

A metodologia adotada para fundamentar o estudo foi uma pesquisa com abordagem aplicada com as técnicas bibliométricas, aliando-se a pesquisa exploratória. Como resultado, identificou-se o perfil dos autores que contribuem no periódico junto ao tema de estudo deste projeto. Na finalização da pesquisa bibliométrica foi realizado um panorama geral dos artigos relacionados, com o objetivo de conhecer quais periódicos, campo de estudo e autores publicaram dentro do escopo selecionado para a revisão bibliométrica.

2.1 Erosão

No intuito de compreender melhor os agentes que caracterizam os fenômenos relacionados a erosão, torna-se necessário apresentar conceitos que caracterizem o que vem a ser um solo e as suas principais características. A ABNT (NBR 6502) define solo como “Material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”, ou simplesmente, produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos.

Os mesmos autores afirmam que o solo é resultado de uma ação integrada e simultânea do clima e de organismos (geralmente rocha), que ocupa determinada localidade ou relevo, durante um determinado período. Durante seu desenvolvimento o mesmo sofre a ação de diversos processos de formação relacionados as perdas, transformações, transportes e adições. Sendo estes, responsáveis pela transformação da rocha em solo, diferenciando-se desta por ser constituído de uma sucessão vertical de camadas que diferem entre si na cor, espessura, granulometria, conteúdo de matéria orgânica e nutrientes de plantas. As figuras 1 e 2 exibem, respectivamente, os fatores de formação do solo (rocha, clima, organismo, relevo e tempo) e a atuação destes de forma conjunta.

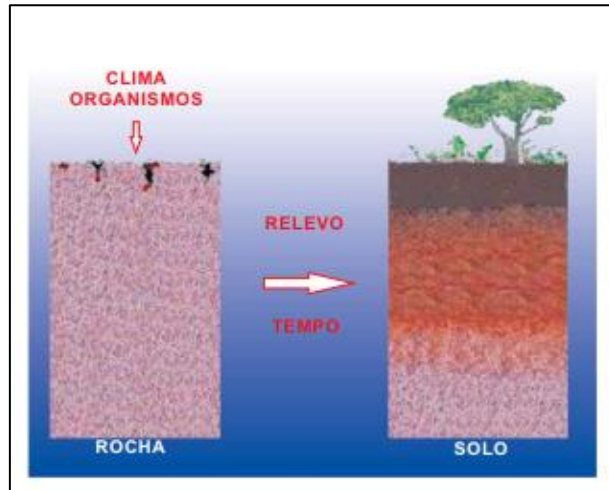


Figura 1. Fatores de formação do solo.
Fonte: Lima e Lima (2007).



Figura 2. A paisagem e os fatores responsáveis pela formação do solo.
Fonte: Lima e Lima (2007).

2.1.1 Definição

Para um melhor entendimento das ocorrências relacionadas ao desenvolvimento de processos erosivos, torna-se necessária uma breve recapitulação do conhecimento dessas ocorrências a partir do seu estágio inicial. Assim, de acordo com o IPT (1986), define-se erosão como um conjunto de processos onde materiais do tipo terroso e rochoso da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados por meio da ação de agentes erosivos, podendo ser estes: vento, água e gelo. O surgimento e evolução deste fenômeno são complexos, por envolverem a ação direta ou indireta, combinada ou não, de diversos fatores, tais como características geológicas, hidrogeológicas, geomorfológicas e climáticas, além dos tipos de solos (tanto em superfície quanto em profundidade) e tipo e distribuição de vegetação e ações do homem que modifiquem as condições naturais anteriores. Levando-se em conta o

agente, os processos erosivos podem ser subdivididos em processos associados à erosão hídrica, eólica ou glacial, sendo a última não relevante no Brasil.

A erosão, entendida como um processo de degradação do solo devido à atuação dos fatores naturais e antrópicos, tem cada vez mais, merecido a atenção dos pesquisadores, tanto no que diz respeito à manutenção da produtividade agrícola como no que se refere à preservação de uma forma geral.

As fórmulas aqui contidas são indicativas dos processos necessários para melhor definição da ação dos fatores erosivos. São métodos aplicáveis a pequenas parcelas, que podem ser introduzidos no futuro e eficazes quando se deseja determinar a quantidade de sedimentos que é produzida em certos locais previamente escolhidos.

Hudson (1981) definiu a erodibilidade como a suscetibilidade do solo em erodir-se podendo ser definida como a quantidade de material que é removido por unidade de área quando os demais fatores determinantes da erosão permanecem constantes. É um fator intrínseco de cada solo e, portanto, alguns erodem com mais facilidade que outros, mesmo que os demais fatores que influenciam a erosão sejam idênticos. Muitos pesquisadores procuram obter índices de erodibilidade de solos através de suas características consideradas fundamentais no processo de erosão (LIMA, 1992).

Wischmeier & Smith do “*National Runoff and Soil Loss Data Center*” da *Universidade de Purdue* (USA) publicaram em 1978 como resultado de pesquisas em mais de 10.000 parcelas experimentais em condições de chuva natural e simulada a “*Universal Soil Loss Equation*” (USLE) ou Equação Universal das Perdas de Solo, agrupando as variações que influenciam essas perdas através da fórmula:

$$A = R.K.L.S.C.P, \text{ onde: (1)}$$

A = perda de solo por unidade de área em t/ha

R = erosividade da chuva em MJ/ha.mm/ha

K = erodibilidade do solo, ou seja, a intensidade de erosão em solo mantido sem cobertura, com as operações culturais normais, declive de 9% e comprimento de rampa de 25 metros, em toneladas/ha (MJ/ha.mm/ha)

L = comprimento da rampa

S = declive do terreno, ou seja, a relação entre perdas de solo de um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa.

C = fator uso e manejo do solo

P = o fator correspondente às práticas conservacionistas.

É o conhecimento desses principais fatores que tem orientado os pesquisadores em suas linhas de pesquisa.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1993) as diferenças do solo permitem que alguns solos sejam mais erodíveis que outros mesmos que variáveis como chuva, declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo sejam as mesmas. Ainda de acordo com esses autores as propriedades do solo que influenciam na erodibilidade são aquelas que afetam a infiltração, a permeabilidade, a capacidade total de armazenamento de água e aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pelo escoamento. A erodibilidade do solo tem seu valor quantitativo determinado experimentalmente em parcelas e é expressa como a perda de solo por unidade de índice de erosão da chuva (EI).

A composição granulométrica ou textura, que consiste na proporção de teores de areia, silte e argila é um dos principais fatores que influem na erodibilidade dos solos. Teores elevados de silte e areia muito fina (Figura 03) favorecem tanto os deslizamentos como a formação de crostas. Quando ocorre o umedecimento, os solos mais siltosos têm sua estabilidade diminuída, sendo as partículas separadas e arrastadas pela enxurrada (LIMA et al.,1992).



Figura 03 - Solos com textura arenosa e média derivados de arenitos, são facilmente erodíveis, como no caso, a erosão em voçoroca.

Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

Solos com marcante gradiente textural (média do teor de argila dos horizontes A/média dos teores de argila dos horizontes B), especialmente os abruptos, são mais suscetíveis do que os demais, pelo elevado teor de areia à superfície o que contribui para a sua desagregação sob a ação dos processos erosivos.

O tipo e classe de estrutura também influem na erodibilidade dos solos. Solos com estrutura em blocos, maciça ou laminar são mais suscetíveis à erosão do que os solos com estrutura granular de tamanho muito pequeno.

Quando maior for o teor de matéria orgânica, menor a tendência do solo a erodir-se, uma vez que há um bom desenvolvimento de agregados estáveis também por influência da atividade intensa de microorganismos, que aumentam a permeabilidade, diminuindo a enxurrada e a erosão.

A mineralogia das argilas também influi de maneira significativa na estabilidade dos agregados. Os solos constituídos basicamente por argilas caulíníticas e óxidos de ferro e alumínio são menos erodíveis do que os solos com argilas 2:1. (Figura 04).

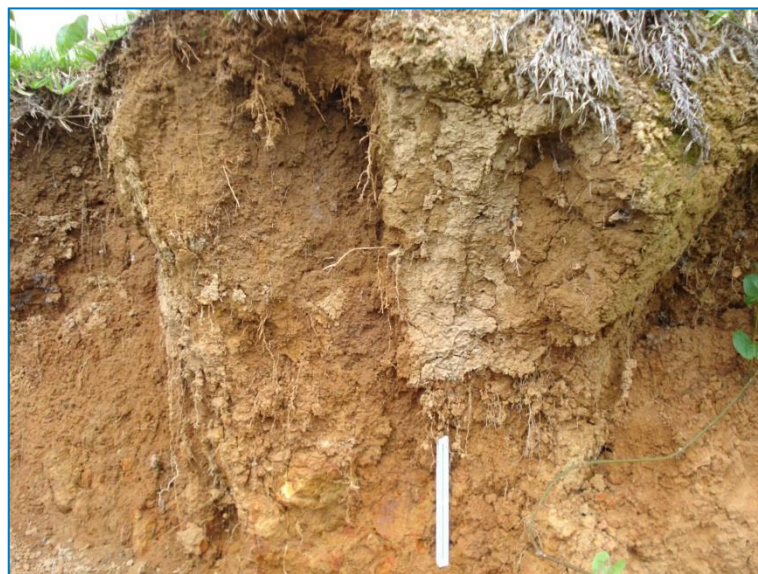


Figura 04 - Solo com argila de atividade alta, formando torrões que se desprendem facilmente do talude, em razão da movimentação das argilas expansíveis (esmetitas).
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

Elevados teores de cátions no complexo sortivo também elevam a agregação de partículas dos solos, favorecendo a floclulação e aumentando as forças de atração que formam pontes de ligação química com a matéria orgânica, reduzindo a influência da erosão hídrica.

São características importantes também, a espessura do solum (compreende os horizontes A e B), transição entre horizontes, a presença de camadas orgânicas, camadas adensadas em subsuperfície, pedregosidade superficial e subsuperficial, presença de calhaus e matacões, drenagem interna e permeabilidade.

O fator K ou a erodibilidade do solo pode ser avaliado através de métodos diretos ou indiretos. A avaliação direta é obtida de forma experimental utilizando medidas em parcelas de solo sem cobertura, com 9% de declive e 21,78 m de comprimento de rampa, de modo que:

$K=a/r$ onde, (2)

$a \rightarrow$ é a perda de solos em t/ha e “r” se obtém pelos gráficos de chuva EI30.

A medida através desse método é onerosa e requer muito tempo para ser representativa, de modo que, Wischmeier et al. (1971) propuseram o uso de um nomograma, que se mostrou muito preciso nas condições de solos dos Estados Unidos.

No Brasil, inúmeros pesquisadores têm procurado fórmulas para adaptar o nomograma às condições locais, uma vez que, o nomograma erra muito em solos com baixo teor de silte e areia muito fina. Uma delas deriva do próprio estudo de Wischmeier:

$$100K = 2,1M^{1,14} (10^{-4}) (12 - a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c - 3) \quad \text{na qual:} \quad (3)$$

K = fator de erodibilidade dos solos

M = % de silte e % de areia muito fina (100% de argila)

a = % de matéria orgânica

b = código de estrutura

c = código de classe de permeabilidade.

A influência do relevo é representada pela forma e classe de relevo, pela morfodinâmica, pelo tipo e comprimento das pendentes e, também, pela declividade das encostas. Maiores declividades determinam maiores velocidades de escoamento das águas, aumentando sua capacidade erosiva. O comprimento da pendente é diretamente proporcional ao tempo de escoamento. Se os declives são acentuados, quanto maior a vertente, maior é a erosão (Figura 03).

Tomando por base a Equação Universal, o relevo é representado pelo fator topográfico (LS), pela qual comprimento de rampa e declividade aparecem associados. As fórmulas propostas por Bertoni (1959) para a região de Campinas, levando em consideração a declividade ou os dois parâmetros acima citados, adaptam-se muito bem às condições brasileiras.

A primeira relaciona a declividade com as perdas de erosão e é a seguinte:

$$T = 0,145D^{1,18} \quad \text{na qual:} (4)$$

T = Perda de solo em kg, por unidade de largura e unidade de comprimento.

0,145 = constante de variação

D = grau de declive do terreno, em porcentagem.

A segunda fórmula, mais completa, inclui o comprimento da rampa e é expressa da seguinte forma:

$$T = 0,018D^{1,18}C^{1,63} \quad \text{onde:} \quad (5)$$

T = perda de solo em quilograma por unidade de largura

D = declividade (%).

C = comprimento de rampa (m);

Segundo o mesmo autor, no Quadro 1 a seguir, tem-se a relação entre o comprimento da rampa e as perdas por erosão, obtidos em experimento em Campinas, S. Paulo:

Quadro 1 - Efeito do comprimento de rampa nas perdas de solo.

Comprimento da rampa	Perdas (t/ha) por segmento de terreno experimental de 25 metros				
	1º (25m)	2º(50m)	3º(75m)	4º(100m)	Média
25 metros	13,9	3	4	5	13,9
50 metros	13,9	25,9			19,9
75 metros	13,9	25,9	38,8	6	26,2
100 metros	13,9	25,9	38,8	51,4	32,5

Fonte.: BERTONI, Conservação de Solos (2005)

Na classificação brasileira de solos, é usado o tipo de relevo para definição das unidades taxonômicas e de mapeamento. Através do relevo, tem-se a declividade média de cada unidade, conforme o Quadro 2, a seguir:

Quadro 2 - Classes de relevo.

Tipo de relevo	Declividade (%)	Tipo de relevo	Declividade (%)
plano	0 a 3	forte ondulado	20 a 45
suave ondulado	3 a 8	montanhoso	45 a 75
ondulado	8 a 20	escarpado	> 75

Fonte.: BERTONI, Conservação de Solos (2005)



Figura 05 - Frente de tabuleiro. O relevo forte ondulado da encosta (declive entre 20 e 45%) e o talude praticamente vertical favorecem a erosão.

Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

A cobertura vegetal, vide figura 06, é a defesa natural contra a erosão. A vegetação mais densa intercepta as gotas de chuva, diminuindo o seu impacto sobre o solo, por outro lado, a decomposição das raízes das plantas forma uma camada superficial ou serrapilheira de folhas e raízes que impedem o escoamento superficial da água.

A adição de matéria orgânica oriunda da decomposição da vegetação e da fauna do solo melhora a estrutura dos solos, aumentando assim sua capacidade de retenção de água.



Figura 06 - A presença de florestas, mesmo em estágio intermediário de regeneração, protege o solo contra a ação erosiva.

Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

O Quadro 3 mostra o resultado de pesquisas do IAC de São Paulo referente às perdas de solo e água sob diferentes coberturas vegetais considerando três classes de solos.

Quadro 3 - Perdas de solos sob diferentes coberturas vegetais.

Tipo de uso do solo	Perdas	
	Solo (t/ha)	Água (% da chuva)
Mata	0,004	0,7
Pastagem	0,4	0,7
Cultura 1	0,9	1,1
Cultura 2	26,6	7,2

Fonte.: BERTONI, Conservação de Solos (2005)

2.1.2 Monitoramento de erosão de solo

O monitoramento de erosão se refere às mensurações sistemáticas de um processo erosivo, sendo necessárias coletas de dados em intervalos fixos ou mesmo variados em tempo, de acordo com a necessidade. Dentre as técnicas de monitoramento, diretamente em campo, as mais conhecidas são o monitoramento de erosão por estações experimentais, o monitoramento de voçorocas, feito por meio de estacas fixadas ao redor das mesmas e os chamados pinos de erosão que são fixados no solo para monitorar a perda de solo por erosão em lençol (GUERRA, 2005).

As voçorocas são feições erosivas de grande porte, geralmente provocadas por aprofundamento de ravinas e/ou processo erosivo por escoamento subsuperficial, produzindo paredes laterais íngremes e fundo achatado (SUERTEGARAY, 2004).

Santana e Nunner (2011), afirmam que, trabalhos relacionados a avaliar o monitoramento de erosões procuram correlacionar os tipos de rochas, classes do solo e relevo (energia e forma das vertentes) com a presença de erosões aceleradas, principalmente em áreas que dizem respeito ao Espinhaço Meridional. Dessa forma, os procedimentos metodológicos utilizados para realizar tal avaliação são caracterizados da seguinte forma:

- Análise e interpretação de fotos aéreas;
- Trabalhos em campo e em laboratório;
- Ensaios de Massa;
- Análise granulométrica.

Pesquisadores da UNESP realizam trabalhos utilizando pelo menos três linhas de abordagens diferentes no intuito de realizar tais análises. Uma destas abordagens faz uso do sensoriamento remoto no intuito de avaliar a influência da declividade e as formas de relevo no que diz respeito

a avaliação da influência da declividade e formas de relevo na geração de feições relacionadas aos processos erosivos, relacionadas a Teoria Geral dos Sistemas.

Uma outra forma de abordagem realizada diz respeito a identificação do grau de alteração das propriedades físicas e químicas dos horizontes superficiais dos solos quanto ao tipo de uso e ocupação, relacionadas por exemplo, ao cultivo de cana de açúcar, cultivo de soja, pastagem e solo urbano.

Os solos são fatores importantes para avaliação da suscetibilidade à erosão de uma determinada região. Características próprias dos solos, conjugadas com o tipo de relevo, vegetação, geologia e geomorfologia, uso do solo e fatores climáticos, determinam a maior ou menor tendência à erosão.

A erodibilidade dos solos é uma característica de cada classe e varia conforme sua constituição física, química e mineralógica. Essa erodibilidade pode ser medida através de ensaios localizados.

Segundo Santana e Nunner (2011) no que diz respeito ao cadastro e monitoramento de voçorocas, estas são realizadas a partir da descrição de características pedológicas de perfis, formas de relevo, localização das feições, aspectos do substrato rochoso, solos e topografia. Sendo assim, tais áreas podem ser classificadas de acordo com os diferentes graus de riscos relacionados a ação erosiva com complementação relacionada a avaliação da erodibilidade baseada na caracterização textural dos materiais.

Dessa forma, o monitoramento relacionado ao avanço das voçorocas pode ser realizado por meio de técnicas de poligonal planimétrica utilizando pinos de erosão, no intuito de monitorar a perda de material por erosão laminar. Para compreender a dinâmica que envolve a formação do escoamento superficial e o surgimento e expansão das incisões, este monitoramento realizado é complementado por meio dos testes de infiltração e de granulometria.

2.1.3 Tipos de solo

Os itens relacionados neste tópico, abordam características referentes a classificação relacionada aos tipos de solos no município de Salvador-Ba, uma vez que, a área de estudo utilizada nesta pesquisa engloba uma determinada localidade que corresponde a este referido município.

-Argissolo Amarelo

Segundo Bertoni (2005), essa classe compreende solos minerais, não hidromórficos com horizonte B textural, distróficos, com baixos teores de Fe_2O_3 (na grande maioria menor do que 7%), de coloração amarela – bruno amarelado a bruno forte, com matizes 7,5 YR e 10 YR, valores e cromas 5 e 6 a 8 respectivamente.

Derivam de sedimentos do Grupo Barreiras, podem ser abrupáticos ou típicos, com estrutura normalmente fraca a moderada em blocos subangulares e textura média/argilosa ou média/muito argilosa. Ocorrem nos topos de “tabuleiros” em relevo plano e suave ondulado (0 a 8% de declive).

Uma das características mais marcantes desses solos, que são profundos, é a presença de um nível maior de coesão das partículas no topo do horizonte B. Essa camada mais adensada influencia notavelmente o comportamento desses solos, diminuindo a percolação d’água e dificultando penetração das raízes das plantas.

Os horizontes superficiais menos argilosos, assentados sobre camada mais densa, podem se tornar alvo fácil de erosão do tipo laminar, caso sejam executadas obras sem prevenção ou recuperação de áreas degradadas, mesmo em relevo com pequena declividade.

- Argissolo Vermelho-amarelo

Para Bertoni (2005), os argissolos distróficos diferenciam-se dos eutróficos pela saturação de bases, que é menor do que 50%. Quando eutróficos, essa saturação é igual ou maior do que 50%. Essas determinações, que constam nos mapas de solos, são feitas em laboratório. Ambos são cauliníticos, com horizonte A moderado. As texturas predominantes são média/argilosa, argilosa/muito argilosa e ainda, média/ muito argilosa. O horizonte A é do tipo moderado.

Para Bertoni (2005), maior gradiente textural e a menor condutividade hidráulica do horizonte B nos Argissolos pode, durante uma chuva forte, determinar uma rápida saturação do horizonte superficial mais arenoso e a redução da infiltração da água na superfície do solo. Isto faz com que desenvolva enxurrada, com energia suficiente para arrastar partículas de solo ao longo da pendente mesmo suavemente ondulada. Assim pode ocorrer também a perda da coesão entre partículas do solo e o caminhamento lateral do fluxo de água acima do horizonte B menos permeável, contribuindo para o processo de erosão. Os Argissolos são, portanto, e em geral, moderada a fortemente suscetíveis à erosão.

A figura 07 e a figura 08 ilustram um talude com Argissolo-Vermelho-Amarelo, com moderada a alta suscetibilidade à erosão. Na primeira foto, há desbarrancamento devido à

inclinação do talude, exposição vertical e sub-vertical do perfil e do saprolito. Os Argissolos têm maior tendência a serem erodidos, principalmente, devido ao gradiente textural (A/B) e à estrutura do horizonte B, em blocos subangulares e angulares, que desmoronam com facilidade quando a água da chuva se infiltra entre as rachaduras que se formam quando o solo está seco.



Figura 07 - Desbarrancamento e exposição de argissolo vermelho-amarelo em taludes sub-verticais, próximo a Catu, Bahia.

Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009



Figura 08 - Detalhe da Figura 07

Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

O desmoronamento ocorre com maior intensidade no saprolito exposto, a partir de 1,50m de profundidade. Os solos com horizonte B textural e argila de atividade alta, antigamente denominados Podzólicos Ta, na classificação atual, estão incluídos na classe dos Luvisolos Háplicos.

- Latossolo Vermelho-amarelo

Segundo Bertoni (2005), a classe dos Latossolos compreende solos profundos e muito profundos com horizonte B latossólico, imediatamente abaixo do horizonte A que é moderado ou proeminente. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. São predominantemente distróficos e de textura argilosa e muito argilosa. A espessura do solo (A+B) é superior a um metro nos perfis típicos. Quando pouco profundos, têm espessura menor do que um metro. Têm elevada porosidade e excelente permeabilidade interna, excessiva ou muito rápida, garantindo a maior resistência aos processos erosivos.

Situam-se em locais com relevo suave ondulado a montanhoso (declives de 3 a 75%).

- Cambissolo Háplico argila de atividade alta e baixa

Para Bertoni (2005), essa classe compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B incipiente subjacente a horizonte A moderado ou proeminente. São solos pouco evoluídos, de características bastante variáveis, mas em geral pouco profundos ou rasos e com teores de silte relativamente elevados.

Apresentam sequência de horizontes do tipo A-Bi-C, com pequena diferenciação entre eles. Devido ao pequeno desenvolvimento do solo, suas características são bastante influenciadas pelo material de origem.

Situam-se em relevos movimentados, em relevo forte ondulado e montanhoso (declives de 20 a >75%), figura 09.



Figura 09 - Área de relevo montanhoso e forte ondulado
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

- Neossolo Quartzarênico órtico típico

De acordo com a EMBRAPA (2006), os Neossolos Quartzarênicos, de forma geral, são solos que apresentam textura areia franca ou sendo estas de areia em todos os horizontes (sequência A-C), em sua essência são caracterizados por serem quartzosos com profundidade bastante variável, contudo, sendo estas sempre acima de 50 cm.

Segundo Bertoni (2005), no que diz respeito ao Neossolo Quartzarênico órtico típico, este tipo de solo é formado a partir de materiais de origem sedimentar, de granulação arenosa.

Pela sua constituição física e pela falta de coesão entre grãos de areia devido à ausência de elementos cimentantes (cátions ligados à matéria orgânica) são facilmente erodíveis.

As camadas arenosas das rochas sedimentares presentes na região do Recôncavo têm grande suscetibilidade à erosão. Quando são atingidas por cortes sub-verticais, praticamente, não conseguem se sustentar e desmoronam (Figura 10). Essas camadas, quando afloram, formam Neossolos Quartzarênicos, (BERTONI, 2005).

Esse, também é um exemplo da influência da composição granulométrica dos solos e das camadas sedimentares na suscetibilidade à erosão.



Figura 10 - Talude sub-vertical em faixa
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

- Neossolo Litólico

De acordo com EMBRAPA (2006), são definidos como Neossolos, solos pouco evoluídos, onde a intensidade baixa dos processos pedogenéticos inviabilizaram a ocorrência de modificações expressivas no material original, também não pertiriam que fosse desenvolvido um horizonte B diagnóstico.

Bertoni (2005) afirma que o Neossolo Litólico se situa, em geral, em relevos mais movimentados – forte ondulado a montanhoso – associados a outras classes de solos, freqüentemente com presença de alguma pedregosidade superficial, especialmente de concreções ferruginosas. O mesmo autor ainda afirma que este solo é muito suscetível à erosão devido à sua pequena profundidade. Quanto mais arenosos, mais erodíveis são os Neossolos Litólicos.

- Vertissolo

Vertissolo diz respeito a um termo que deriva do latim *vertere*, e seu significado poder ser entendido como inverter ou girar. Neste sentido, diz respeito a movimentação de massa do solo, onde pode ocorrer a inversão de materiais. (FAO, 2014).

De acordo com Lima (2014), os vertissolos são constituídos por um material mineral, possuem seu horizonte vértico e uma pequena variação textural em seu perfil, que é insuficiente para caracterizar um horizonte B textural. A variação no teor de água faz com que ocorra variação no volume do solo, onde em períodos de secas, as mesmas passam a exibir fendas e a movimentação de massa, faz com que ocorram superfícies de fricção.

Outra feição comum que é identificável em alguns locais, em períodos secos, é o microrrelevo chamado “gilgai”, formando pequenas elevações em superfície, devidas ao movimento das argilas.

Exibem seqüência de horizontes A, Cv e Cvg com pouca diferenciação entre os mesmos. As argilas são muito plásticas e muito pegajosas, tornando as áreas onde esses solos ocorrem problemáticas para o trabalho de máquinas e tratores em épocas úmidas, (BERTONI, 2005).

Como citado neste mesmo item, em períodos secos os vertissolos exibem rachaduras com alguns centímetros de largura, que se aprofundam pelo perfil, podendo chegar até 1 metro ou mais. Essas rachaduras podem ser preenchidas por uma estrutura granular formada pelas argilas associadas à matéria orgânica rica em cátions, que constitui uma feição denominada “self-mulching” que pode proteger o solo do excesso de evaporação.

Sob o ponto de vista de construções, são solos problemáticos, tendo em vista o movimento interno devido às argilas 2:1. As estruturas podem ser fortemente influenciadas, podendo haver desmoronamentos, quedas de paredes ou tombamento de postes de linhas elétricas (figuras 11e 12).

Os desmoronamentos de barrancos e taludes são comuns em vertissolos, por isso, obras nesses locais têm que seguir as normas e precauções necessárias para evitar degradação.



Figura 11 - Vertissolo, com inclinação de postes, em parte devido ao movimento do solo.
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009



Figura 12 – Detalhe da inclinação de postes, em parte devido ao movimento do solo
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

- Solos de mangue

São solos halomórficos, alagados, que se distribuem nas partes baixas e próximas ao mar da Baía de Todos os Santos, com influência das marés, onde a diminuição de corrente de água favorece a deposição de sedimentos de material fino, em mistura com detritos orgânicos, (BERTONI, 2005).

A condição de permanente alagamento impede a mineralização da matéria orgânica, sendo comum, no perfil dos solos de mangue, a ocorrência de material orgânico pouco transformado, muito próximo às formas originais do material vegetal.

Os solos de mangue são considerados “tipos de terreno”, ocupados pelo ecossistema de manguezal, cujos solos predominantes são o Gleissolo Sálico e Gleissolo Tiomórfico. São formados em condições halomórficas e contém elevadas quantidades de sais solúveis em decorrência do contato com o mar. Na composição granulométrica predominam as frações mais finas: argila, silte e areias finas e muito finas. As cores são acinzentadas a pretas e são muito elevados os teores de Ca^{++} , Mg^{++} e, sobretudo de Na^{+} , (BERTONI, 2005).

A acumulação dos compostos de enxofre ocorre em deltas de rios e sob florestas de mangue. Os rios contribuem com os óxidos ou hidróxidos de ferro; o mar, com os sulfatos e a vegetação de mangue, com a produção de matéria orgânica, que reduz os sulfatos e o ferro (PRADA-GAMERO, 2004).

A combinação dos elevados conteúdos de matéria-orgânica com a condição anaeróbia, as fontes de Fe reativo (óxidos dos sedimentos) e as fontes de $(SO_4)_2^-$ (água do mar) prontamente disponíveis fazem dos solos de mangue um ambiente propício à ocorrência da redução bacteriana do sulfato a sulfeto e seu conseqüente acúmulo sob a forma de pirita, desencadeando o processo conhecido como piritização ou sulfidização (PRADA-GAMERO,

2004). Nos estágios intermediários é comum a formação de ácido sulfídrico H₂S que exala odor característico.

Os solos de mangue (Figuras 13 e 14), em função do excesso de enxofre, são problemáticos sob o ponto de vista da corrosão de estruturas metálicas, que devem ser protegidas contra o ataque dos ácidos.



Figura 13 - Solos de mangue.
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009



Figura 14 - Trabalhos de colocação de dutos sobre esses solos.
Fonte: Mapeamento Geoambiental - Ativo Sul, 2009

O quadro 4 exhibe os tipos de solos brasileiros com as suas principais características.

Quadro 4 – Classificação dos solos brasileiros

Tipo de Solo	Características Principais	Símbolo adotado
Argiloso	Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B	P
Cambissolo	Solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta.	C
Chernossolo	Solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte A chernozêmico seguido por: a) Horizonte B incipiente ou B textural, em todos os casos com argila de atividade alta e saturação por bases alta (exclusive Vertissolo); ou c) Contato lítico desde que o horizonte A chernozêmico contenha 150 g kg ⁻¹ de solo ou mais de carbonato de cálcio equivalente.	M

Espodossolo	Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B espódico imediatamente abaixo de horizonte E, A, ou horizonte hístico, dentro de 200 cm da superfície do solo ou de 400 cm se a soma dos horizontes A+E ou dos horizontes hístico (com menos de 40 cm) + E ultrapassar 200 cm de profundidade.	E
Gleissolo	Solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 150 cm da superfície do solo ou a profundidades entre 50 cm e 150 cm desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E, ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos.	G
Latossolo	Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura.	L
Luvissolo	Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases alta na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA), imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A (exceto A chernozêmico) ou sob horizonte E	T
Neossolo	Solos pouco evoluídos constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Horizontes glei, plíntico, vértico e A chernozêmico, quando presentes, não ocorrem em condição diagnóstica para as classes Gleissolos, Plintossolos, Vertissolos e Chernossolos, respectivamente.	R
Nitossolo	7 Solos constituídos de material mineral, com 350 g kg ⁻¹ ou mais de argila, inclusive no horizonte A, que apresentam horizonte B nítrico abaixo do horizonte A. O horizonte B ítrico apresenta argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B dentro de 150 cm da superfície do solo. 7.1.1	N
Organossolo	Solos constituídos por material orgânico (conteúdo de carbono orgânico maior ou igual a 80 g kg ⁻¹ de TFSA), que apresentam horizonte hístico	O
Planossolo	Solos constituídos por material mineral com horizonte A ou E seguidos de horizonte B plânico. Horizonte plânico sem caráter sódico perde em precedência taxonômica para o horizonte plíntico.	S
Plintossolos	Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte plíntico ou litoplíntico ou concrecionário	F
Vertissolos	Solos constituídos por material mineral com horizonte vértico entre 25 e 100 cm de profundidade e relação textural insuficiente para caracterizar um B textural.	V

Fonte: EMBRAPA (2013)

2.1.4 Erosão do tipo ravina

Diferentes autores propõem que há um continuum entre canais resultantes de erosão hídrica (sulcos, ravinas e canais fluviais), e que qualquer diferenciação em classes será, em certa medida, subjetiva (GRISSINGER, 1996; POESEN et al. 2003, 2006). Esta subjetividade está patente nas próprias definições de ravina presentes na literatura (Quadro 5). Os exemplos apresentados mostram que se por um lado as várias definições associam a forma à ação erosiva do escoamento concentrado, por outro cada uma lhe atribui diferentes propriedades, desde o comportamento hidrológico à morfologia, à posição topográfica, ou à relação com as atividades humanas.

Quadro 5 - Definições de “ravina” na literatura.

Definições de ravina	Autores
“canal de drenagem cuja largura e profundidade não permitem uma lavoura normal”	FAO (1965) ¹
“um canal de drenagem efêmero entalhado em depósitos sedimentares espessos ou rocha mãe”	Gregory e Walling (1973) ²
“um canal originado pelo escoamento concentrado, com uma profundidade mínima de 0,3 m, e que resulta na fragmentação da vertente”	Zachar (1982)
“um canal relativamente fundo, instável e em processo de erosão, que se forma na cabeceira, lados ou fundo de um vale onde nenhum canal bem definido existia previamente”	Schumm et al. (1984) ³
“um canal resultante de incisão fluvial em materiais não consolidados, caracterizado por transmissão efêmera de escoamento, lados declivosos, e cabeceira fortemente declivosa ou vertical”	Ebisemiju e Ekiti (1989)
“um canal geralmente permanente, de secção em V e paredes laterais com um declive próximo do ângulo de estabilidade dos sedimentos não consolidados”	Bull e Kirkby (1997)
“um canal erodido pelo fluxo concentrado mas intermitente de água, [que tem lugar] habitualmente durante e imediatamente após a ocorrência de chuvas intensas, sendo profundo o suficiente para interferir com a lavoura normal e não ser por ela eliminado”	Soil Science Society of America (2001)
“um canal de drenagem relativamente permanente, de paredes declivosas, e que regista escoamento efêmero em contextos de alimentação em precipitação”	Morgan (2005)
“uma incisão ao longo de uma linha de drenagem que apresenta sinais claros de degradação, com uma cabeceira constituindo uma quebra bem definida no declive”	Hancock e Evans (2006)
“um canal profundo numa vertente, geralmente entalhado pelo escoamento, e frequentemente sem fluxo permanente”	Kirkby e Bracken (2009)

Fonte: ¹Cit. por Bocco (1991), ²Cit. por Burkard e Kostachuk (1997), ³Cit. por De rose et al. (1998)

O primeiro pesquisador a reconhecer a importância geomorfológica das ravinas nas encostas foi Horton (1945), na medida em que chamava atenção do seu papel como condutores de água e sedimento e, ao mesmo tempo, como embriões de um sistema

dedrenagem, através do recuo do sistema de ravinas e micro-pirataria, que é o processo onde algumas ravinas capturam água de outras ravinas. O conceito de evolução de ravinas, segundo Horton, baseia-se no fato de que quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, se dá o início do escoamento (*runoff*). A água acumula-se em depressões (microtopografia) na superfície do solo, até que começa a descer a encosta, através de um lençol (*sheetflow*), que pode evoluir para ravina. A remoção inicial de partículas é atribuída, pelo autor, à força de cisalhamento exercida pelo runoff à medida que este aumenta gradativamente em profundidade, encosta abaixo. É a partir daí que propõe o conceito de belt of no erosion (área sem erosão), ou seja, próximo ao topo da encosta (divisor) a força de cisalhamento imposta pelo fluxo laminar (*sheetflow*) não é suficiente para remover partículas, mas, à medida que esse fluxo de água aumenta e acelera encosta abaixo, ocorre o cisalhamento das partículas de solo e, finalmente, a erosão começa a ocorrer a partir de uma distância crítica. Ou seja, começa a ocorrer uma incisão no solo, onde o fluxo de água tende a se concentrar, formando as ravinas. Mas as ravinas também podem se formar próximo à base das encostas, onde uma pequena incisão pode recuar em direção ao topo da encosta.

Segundo Morgan (1986), esta incisão pode estar associada à saturação causada pelo escoamento superficial, em vez de estar relacionada ao fluxo Hortoniano. As ravinas podem aumentar em comprimento, largura e profundidade, podendo evoluir para voçorocas, ou então para uma rede de canais conectados, pelo recuo das encostas, formando um sistema de drenagem, figura 15:

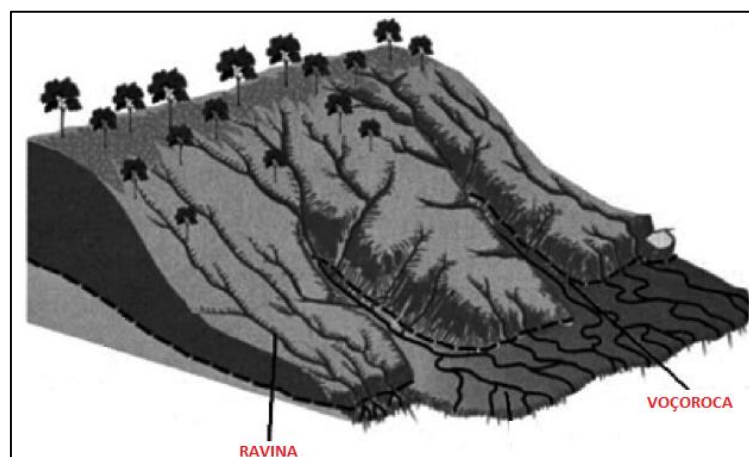


Figura 15—Representação da Ravina

Fonte: TEIXEIRA, W. et al. (Org). Decifrando a Terra. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

Quanto aos limites em termos de profundidade de uma ravina, o assunto também é bastante controverso, podendo-se encontrar uma série de limites. Bergsmaet al. (1996) consideram que a remoção de solo, através do escoamento superficial concentrado em vários canais rasos, que denominam de ravinas, deve atingir no máximo 20 cm e serem facilmente obliterados pela aragem do solo. Mas, no mesmo livro, Bergsmaet al. (1996) também propõem que a erosão em canais com profundidades até 30 cm podem ser consideradas ravinas.

Enfim, talvez uma classificação que leve em conta o fato de as ravinas poderem ser obliteradas pela aragem do solo, ou então, que não são características erosivas tão permanentes na paisagem, podendo mudar sua posição a cada ano, seja também aceita. Além disso, as ravinas podem evoluir para voçorocas, em especial quando não são obliteradas pelas práticas agrícolas, ou quando chuvas concentradas caem sobre encostas com ravinas, sem proteção vegetal e que estejam sob superpasteio. O alargamento e aprofundamento dessas ravinas pode dar origem a voçorocas, devido à ação erosiva das águas na base e nas partes laterais das ravinas (GUERRA, 1995; GUERRA E BOTELHO, 1996).

Em virtude dos fatos analisados acima, o início da formação de ravinas pode ser considerado como crucial no processo erosivo, que pode estar associado a um rápido aumento na concentração de sedimentos contidos no escoamento superficial. Por isso, o desenvolvimento de ravinas adquire uma grande importância prática e aplicada na conservação dos solos. Segundo Foster (1988), a não distinção entre processos erosivos causados por ravinas e interrivas pode explicar a pouca capacidade de prever erosão de alguns modelos, como é o caso da Equação Universal de Perda de Solo.

2.1.5 Erosão do tipo voçoroca

A erosão superficial provocada pela água de chuva, associada ou não aos processos de erosão interna e esqueletização, tem início com a erosão laminar, podendo em seguida e em ordem cronológica passar pelas fases de formação de sulcos, ravinas e voçorocas. Neste tipo de erosão estão implicados os agentes erosivos, ou seja, a erosividade, que corresponde a ação das gotas de chuva, do escoamento superficial e de fluido agressivos, os fatores resistentes à erosão, que constitui a erodibilidade caracterizada pelas propriedades estruturais, texturais e físico-químicas do solo e finalmente os fatores que modulam a ação erosiva sendo os principais a geomorfologia e a cobertura vegetal.

A voçoroca é o estágio mais avançado do processo erosivo. Este estágio requer um controle imediato, procurando-se estabilizar ou impedir o prosseguimento de sua ação destruidora e manter uma vigilância periódica até que a recuperação natural ou

projetada atinja a estabilização requerida. A voçoroca é formada a partir de um cenário já existente de erosão, causada por um ou mais fatores, que corroboram em processos erosivos evolutivos. Sendo a voçoroca um tipo de erosão hídrica.

Segundo a classificação utilizada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), as voçorocas apresentam como características principais a queda em bloco e afloramento do lençol freático e/ou surgência de água, não estando neste último caso sua definição ligada a parâmetros dimensionais, como comprimento, largura e profundidade (VIEIRA, 2008). Canil et al (1995) descrevem como sendo resultantes da ação combinada de escoamento superficial e subterrâneo, sendo canais profundos que apresentam paredes irregulares e perfil transversal em "U".

Guerra (2011) no Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico define voçoroca como sendo escavação ou rasgão do solo ou de rocha decomposta, ocasionado pela erosão do lençol de escoamento superficial. Quando em grande número e relativamente paralelas, dão aparecimento a verdadeiras áreas de badlands (terras impróprias para agricultura que foram erodidas pela erosão pluvial). Segundo Oliveira (1999), voçorocas são canais incisivos naturais resultantes de alterações naturais ou causados pela ação antrópica, com profundidade e largura superiores a 0,50 m.

Segundo Guerra e Cunha (2011):

[...] As voçorocas são características erosivas relativamente permanentes nas encostas, possuindo paredes íngremes e, em geral, fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante os eventos chuvosos. Algumas vezes, as voçorocas se aprofundam tanto, que chegam a atingir o lençol freático. Comparando com os canais fluviais, as voçorocas possuem, geralmente, maior profundidade e menor largura. Elas estão associadas com processos de erosão acelerada e, dessa forma, com a instabilidade da paisagem (GUERRA e CUNHA, 2011, p. 183-184).

2.2 Fotogrametria

Abib (1982), define fotogrametria como a ciência que permite a medida precisa das feições representadas em uma fotografia, propondo-se a estudar e definir com precisão a forma, natureza, dimensões e posição no espaço de um objeto qualquer, utilizando

essencialmente medidas e observações feitas sobre uma ou várias fotografias. Morgado (1997), acresce que a fotogrametria é uma disciplina complexa, com componentes básicos que incluem a matemática, formação e processamento de imagens, e a respectiva instrumentação necessária.

O crescente avanço tecnológico, vivida nas últimas décadas, influenciou também os conceitos e os procedimentos adotados na fotogrametria, porém, desde seu surgimento como técnica de mapeamento, seus instrumentos e procedimentos sempre se destacaram dentre a vanguarda tecnológica. Conforme descreve Abib (1982), François Arago, ao apresentar a então invenção da fotografia à Academia de Ciências da França, em 1839, não se esqueceu de incluir, entre suas possíveis aplicações, o uso nos levantamentos topográficos, fato que ocorreria por volta de 1850, com o Capitão Aimé Laussedat, na construção da carta da França.

As primeiras aplicações aéreas ocorreram na França em 1858 e, em Moscou, em 1900, através da utilização de balões. Todavia, somente após o surgimento da aviação e, principalmente após a Primeira Guerra Mundial, é que a Fotogrametria ocupou papel de destaque no mapeamento topográfico. Assim, a demanda por novas tecnologias fez surgir instrumentos de precisão como sistemas de lentes e componentes mecânicos e, posteriormente, sistemas eletrônicos e digitais.

Segundo Mendonça Júnior et al. (2001), os primeiros desenvolvimentos da fotogrametria envolvendo técnicas computacionais ocorreram na década de 50, ainda que somente efetivada, em meados da década de 70, dando origem à Fotogrametria Analítica, a qual se caracteriza pela substituição dos componentes óptico-mecânicos por sistemas servo-mecânicos, levando em consideração recursos de apoio a cálculos matemáticos. Ainda segundo os mesmos autores, como aprimoramento da capacidade de processamento e armazenamento dos meios computacionais, a fotogrametria passou a utilizar as imagens digitais como fonte de dados e a adoção de cálculos matemáticos que simulam a visão humana, capaz de permitir a geração de um ambiente estereográfico, necessário à realização dos trabalhos de medição e restituição fotogramétrica, denominada então de Fotogrametria Digital.

Morgado (1997) descreve que o sucesso da Fotogrametria Digital se baseia, em grande parte, no seu potencial de automação de tarefas, antes não alcançado. Mesmo alguns pacotes de programas disponíveis no mercado, (que incluem procedimentos

automatizados, como por exemplo, orientação interior das imagens, aerotriangulação e produção de ortofotos) a automatização é assunto de intensa investigação e consequente atualização.

Entre as principais etapas de um projeto aerofotogramétrico, que ganharam impulso com a adoção de procedimentos digitais, destaca-se a triangulação. Segundo Lugnani (1987), o conceito mais tradicional de triangulação equivale ao método fotogramétrico de estabelecimento de controle horizontal e vertical, através da relação geométrica de imagens adjacentes. Conceitos mais atuais, de acordo com o mesmo autor, relacionam a fototriangulação ao método fotogramétrico de determinação de coordenadas, de pontos extraídos das imagens, ao espaço objeto, através da relação geométrica das imagens adjacentes, de pontos de controle no espaço objeto, e de um conjunto aproximado de parâmetros.

Com base no conceito de extração de coordenadas de pontos em imagens adjacentes, Jacobsen (1998) relata que o tempo consumido pela medição manual em processamentos analógicos e analíticos pode ser drasticamente reduzido, pela adoção de procedimentos automatizados de detecção e cálculo de pontos, com a Fotogrametria Digital.

A introdução de procedimentos automatizados na Fotogrametria não é fruto da recente tecnologia digital. Instrumentos analíticos, projetados a partir da década de 70, contavam com dispositivos capazes, por exemplo, de realizar a orientação interior das fotografias aéreas, a partir da detecção e medição das marcas fiduciais. O procedimento de orientação interior, independente da tecnologia, consiste no estabelecimento da relação entre as coordenadas fotográficas e as coordenadas das marcas fiduciais, obtidas com a utilização de câmaras métricas, (Morgado, 1997).

Embora não seja pioneira, pelo menos, na automatização de rotinas de orientação interior, a adoção de procedimentos digitais ampliou as possibilidades e métodos pelos quais as marcas fiduciais são detectadas e medidas, permitindo o surgimento de técnicas cada vez mais eficientes, baseadas no processamento digital de imagens.

Um conceito atualmente em evidência nas atividades de fotogrametria, é o Modelo Digital de Terreno. Miller & Laflame (1958), apud Queiroz Filho (1993), conceituam o Modelo Digital de Terreno –MDT, como a representação numérica de uma superfície contínua do terreno, através de pontos selecionados. Queiroz Filho (1993), acrescenta que a definição atual é mais genérica, caracterizando-se por uma forma

particular de modelagem computadorizada da superfície, tratando de problemas específicos de representação numérica da superfície terrestre. Cintra (1990), define MDT como uma representação simplificada da superfície do terreno, através de modelos matemáticos. Na Fotogrametria Digital, o MDT, assim como as imagens aéreas, é base para a produção de Ortofotos e Mosaicos Digitais, controlados geometricamente. Sua construção pode ser, por exemplo, por meio de levantamentos topográficos em campo, por procedimentos fotogramétricos, ou através da conversão de dados vetoriais, oriundos de cartas topográficas, compilada na forma digital ou em papel, sendo, neste caso, necessária sua digitalização.

Sabe-se que a Fotogrametria permite a extração de dados referentes ao relevo, em regiões devidamente cobertas por estereoscopia, ou seja, cobertas por mais de uma imagem aérea, segundo modelos matemáticos de orientação das fotografias. Dessa forma, a região do terreno imageada em estereoscópica pode ter suas feições visíveis mapeadas, envolvendo a interpretação e a extração das mesmas, o que é conceitualmente conhecido como restituição fotogramétrica.

Atualmente, os principais aplicativos utilizados em fotogrametria permitem a extração automática do Modelo Digital do Terreno, fazendo uso basicamente da correlação de imagens. Para Morgado (1997), qualquer sistema automatizado para posicionamento tridimensional deve incluir um módulo de estabelecimento automático de pontos homólogos para imagens estereoscópicas, e essa solução, baseada na correlação de imagens, pode ser melhor desenvolvida em etapas de aerotriangulação, de extração de feições, bem como pela etapa de produção de modelos digitais de terreno.

Mesmo em desenvolvimento, a Fotogrametria Digital atualmente conta com uma grande variedade de equipamentos e produtos, introduzidos no mercado desde a última década. Dentre os principais produtos em meio digital, encontram-se as Ortofotos.

Ortofotos, segundo Simmons (2000), são imagens aéreas que sofreram um processo de ortoretificação, para corrigir efeitos causados pelo sistema de lentes da câmara, variações na escala da imagem e das respectivas feições, através da utilização de dados do relevo. Para Rossa et al (2002), uma ortofoto é um documento com uma precisão geométrica comparável a uma carta, contendo, no entanto, todo o mesmo detalhe inerente a uma fotografia aérea.

Atualmente, a utilização de ortofotos em projetos que envolvam informações gráficas, derivadas de mapeamento, tem sido bastante difundida, principalmente nos Sistemas de Informação Geográfica, com ferramentas, cada vez mais aperfeiçoadas de visualização e análise de dados, além de recursos tecnológicos de transmissão e distribuição de dados digitais em alta velocidade, e impressão de imagens com alta qualidade. Fatores como a escala do original fotográfico bem como a resolução do modelo digital de terreno, são de suma importância para a qualidade final das ortofotos. Porém, quanto à radiometria, a qualidade da ortofoto está diretamente ligada à qualidade da imagem original, sujeita a imperfeições oriundas de defeitos ocorridos na tomada das imagens aéreas, na revelação, ou mesmo, na escanerização. Segundo Rossa et al (2002), é necessário ter um cuidado bastante grande em relação à cor, no caso de proceder à sua impressão em grandes quantidades, de forma que os mosaicos não sejam perceptíveis e exista uma harmonia nas cores da ortofoto.

2.2.1 Processo Fotogramétrico

2.2.1.1 Orientação Interior

Na fotogrametria digital a orientação interior não é mais feita sobre dia filmes utilizados nas gerações anteriores da Fotogrametria (AUGUSTO, 1999). A recuperação do feixe perspectivo é normalmente realizada através de uma transformação matemática (afim, ortogonal, ou isogonal) entre os sistemas de coordenadas das marcas fiduciais (mm) e digital (píxel) (ANDRADE, 1998).

Os pontos utilizados no cálculo dos parâmetros da transformação são as marcas fiduciais em milímetros presentes no certificado de calibração da câmara. Na imagem digital, as coordenadas em píxel podem ser medidas manual ou automaticamente.

A orientação interior vai permitir a conversão das coordenadas do sistema digital (píxel) para o sistema das marcas fiduciais (milímetros), através de um modelo matemático utilizado para esse fim, que é a transformação afim, geralmente associada a um ajustamento de observações pelo modelo paramétrico e pelo método dos mínimos quadrados.

2.2.1.2 Orientação Exterior

Segundo AUGUSTO (1999), na fotogrametria digital, as relações entre as coordenadas no sistema imagem (fotografia) e as coordenadas no sistema objeto (terreno) são calculadas sem a introdução das coordenadas de modelo como passo intermediário, o que permite o cálculo simultâneo das orientações relativa e absoluta.

Para determinar os seis (6) parâmetros da orientação exterior, incluindo as coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva (X_0 , Y_0 , Z_0) e os ângulos de rotação ou atitude do sensor (ω , ϕ , κ) de uma fotografia aérea, utiliza-se a solução da resseção espacial.

X_0 , Y_0 e Z_0 , representam a posição do centro de perspectiva nos eixos X, Y e Z. Já ω representa a rotação do eixo x em relação a X, enquanto ϕ representa a rotação do eixo y em relação a Y. Por fim, κ representa a rotação do eixo z em relação a Z. Os três ângulos são contados no sentido anti-horário (Figura 16).

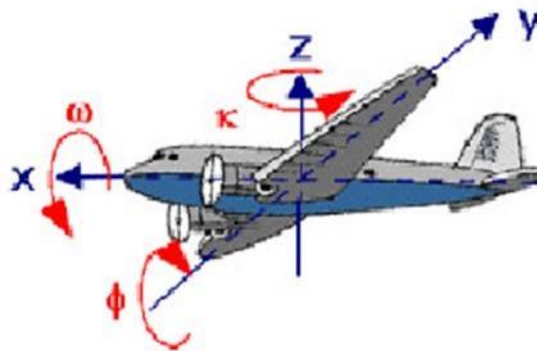


Figura 16 - Ângulos de atitude do avião ϕ, ω, κ
 Fonte: adaptado de BRITO e COELHO (2007)

2.2.1.3 Ressecção Espacial

A ressecção espacial em fotogrametria consiste no cálculo dos parâmetros de orientação exterior (posição e atitude) das imagens fotográficas em relação a um referencial, isto é, determinam-se as coordenadas dos centros perspectivos (X_0, Y_0, Z_0) e os ângulos de orientação do sistema fotogramétrico em relação ao referencial de terreno (ω, φ, κ) foto a foto. São necessários pelo menos três pontos de apoio de campo (controle) para cada imagem, supondo-se que os elementos da orientação sejam conhecidos. Entretanto, são utilizadas mais observações (superabundância de dados), objetivando a utilização do método dos mínimos quadrados (MMQ).

Os ângulos da atitude do sensor são inseridos na matriz de rotação R , que relaciona o sistema objeto e imagem (AUGUSTO, 1999).

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\varphi \cdot \text{sen}\kappa & -\text{sen}\varphi \\ \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\omega \cdot \cos\kappa - \cos\omega \cdot \text{sen}\kappa & \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\omega \cdot \text{sen}\kappa + \cos\omega \cdot \cos\kappa & \cos\varphi \cdot \text{sen}\omega \\ \text{sen}\varphi \cdot \cos\omega \cdot \cos\kappa & \text{sen}\varphi \cdot \cos\omega \cdot \text{sen}\kappa - \text{sen}\omega \cdot \cos\kappa & \cos\varphi \cdot \cos\omega \end{bmatrix} \quad (06)$$

A solução da ressecção espacial está baseada nas relações matemáticas (Equações 3.7 e 3.8) existentes entre as coordenadas no espaço imagem (ξ e η) e as coordenadas no espaço objeto ou terreno (X, Y, Z), que são obtidas pela aplicação da condição de colinearidade.

Equações de Colinearidade:

$$\xi = \xi_0 - c \cdot \frac{R_{11} \cdot (X - X_0) + R_{21} \cdot (Y - Y_0) + R_{31} \cdot (Z - Z_0)}{R_{13} \cdot (X - X_0) + R_{23} \cdot (Y - Y_0) + R_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (07)$$

$$\eta = \eta_0 - c \cdot \frac{R_{12} \cdot (X - X_0) + R_{22} \cdot (Y - Y_0) + R_{32} \cdot (Z - Z_0)}{R_{13} \cdot (X - X_0) + R_{23} \cdot (Y - Y_0) + R_{33} \cdot (Z - Z_0)}$$

2.2.1.4 Interseção Espacial

A interseção espacial é calculada a partir das coordenadas de pontos no sistema analógico (mm) e não no sistema digital (píxel). Assim sendo, são necessários tanto os parâmetros da transformação afim (orientação interior) quanto os parâmetros da orientação exterior ($X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa, \dots$).

Uma vez determinados os parâmetros da orientação exterior, tem-se, através das equações de colinearidade, estabelecida a relação entre imagem e objeto no terreno. Os parâmetros rik são elementos da matriz de rotação espacial, que descreve a atitude do sensor no espaço em relação ao sistema de coordenadas X, Y e Z.

De acordo com BRITO e COELHO (2007), através das equações de colinearidade, a extração das coordenadas X e Y será:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\xi - \xi_0) + r_{13} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\xi - \xi_0) + r_{33} \cdot c} \quad (08)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\xi - \xi_0) + r_{23} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\xi - \xi_0) + r_{33} \cdot c}$$

Fazendo:

$$b_{xi} = \frac{r_{11}(\xi - \xi_{0i}) + r_{12}(\xi - \xi_{0i}) + r_{13} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_{0i}) + r_{32}(\xi - \xi_{0i}) + r_{33} \cdot c} \quad (09)$$

$$b_{yi} = \frac{r_{21}(\xi - \xi_{0i}) + r_{22}(\xi - \xi_{0i}) + r_{23} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_{0i}) + r_{32}(\xi - \xi_{0i}) + r_{33} \cdot c}$$

O índice i corresponde aos dados da respectiva fotografia.

A partir das coordenadas X_0, Y_0 e Z_0 do centro perspectivo, dos parâmetros da orientação interior e exterior, relacionados à constante k de cada fotografia, têm-se quatro equações para três coordenadas desconhecidas de um ponto P (X, Y, Z).

A partir das equações anteriores, chega-se:

$$Z = \frac{X_{02} - Z_{02}k_{x2} + Z_{01}k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}} \quad (10)$$

A Figura 17 ilustra o uso da interseção espacial para o cálculo de X, Y e Z no terreno.

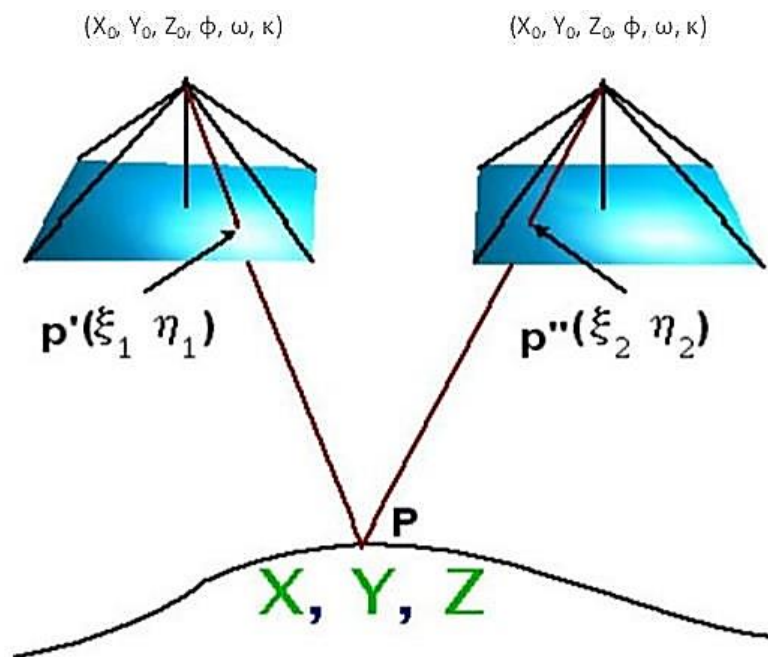


Figura 17 - Cálculo da interseção espacial
Fonte: adaptado de BRITO e COELHO (2007)

2.2.1.5 Fototriangulação

Segundo BRITO e COELHO (2007), fototriangulação é o processo de se determinar as coordenadas do terreno (ou do espaço-objeto) dos pontos fotogramétricos selecionados sobre as imagens fotográficas (espaço-imagem). A fototriangulação por feixes perspetivos pode ser entendida como a execução de uma ressecção espacial simultaneamente à execução da interseção espacial, para um

conjunto de imagens digitais adquiridas sobre determinado trecho do terreno, o que permite a obtenção simultânea dos seis parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do bloco fotogramétrico.

O método dos feixes perspectivas permite que a fototriangulação seja executada para todas as imagens obtidas com câmaras fotogramétricas aéreas que compõem o espaço imagem e para todos os pontos fotogramétricos contidos nessas imagens em um único processo. Esse procedimento permite a reconstrução ótima da geometria dos feixes de raios luminosos formadores do espaço imagem no momento da aquisição das imagens fotográficas. O processo vale-se do método dos mínimos quadrados (MMQ) para minimizar a função que quantifica o desvio padrão do ajustamento, de forma que cada raio ajustado, originando-se em uma posição qualquer do espaço objeto, passe o mais próximo possível do seu homólogo no espaço imagem e do centro de perspectiva da imagem (SILVEIRA,2005).

Também conhecido como ajustamento por feixe perspectivo ou *bundle block adjustment*, o método caracteriza-se pelo fato de a unidade elementar para o ajustamento ser um raio projetado, e todas as imagens fotográficas que compõem o espaço imagem terem suas coordenadas do centro de perspectiva (CP) e ângulos de atitude ajustados de forma conjunta e simultânea. A Figura 18 mostra um bloco de imagens e seus respectivos feixes perspectivas.

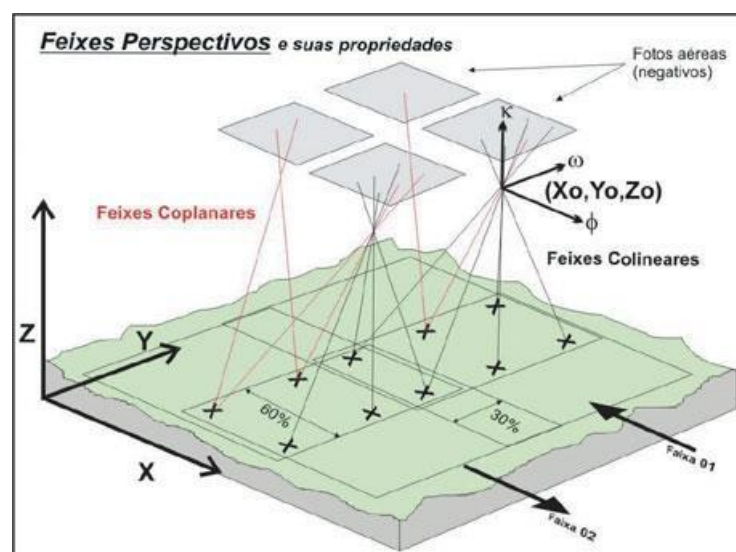


Figura 18 - Bloco de 4 imagens fotográficas e seus feixes perspectivas Fonte: MUNDOGEO (2014)

2.3 Vant para fins Fotogramétricos

2.3.1 Mapeamento com VANT

O termo VANT é o mais utilizado para classificar os Veículos Aéreos Não Tripulados ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle), ou seja, que tenham autonomia de voo sem piloto, também chamados de RPA (Remotely-Piloted Aircraft) ou RPAS (Remotely-Piloted Aircraft Sistem). A possibilidade de aquisição de imagens por esses equipamentos tem se difundido nos últimos anos, aumentando a insegurança no espaço aéreo. Sendo assim, surge necessidade de uma regulamentação detalhada e métodos que auxiliem na integração segura desses veículos ao espaço aéreo controlado.

Recentemente, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, Órgão Central do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), que tem a competência de legislar acerca dos procedimentos para o acesso ao Espaço Aéreo, publicou a Instrução do Comando da Aeronáutica ICA-100-40-DECEA, com o objetivo de regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao espaço aéreo por Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS). A referida ICA 100-40-DECEA estabelece três classes para os RPAS (até 2 kg, acima de 2 kg até 25 kg e acima de 25 kg) e fixa critérios para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro (BRASIL, 2015).

Segundo Junior (2016), o imageamento com RPA tem algumas características distintas da fotogrametria aerotransportada tradicional seja pelo uso de câmeras não métricas sejam pelos algoritmos empregados no processamento dos dados gerados. A sobreposições longitudinais e laterais são bem superiores em geral valores mínimos empregados estão em 60% e 40% respectivamente em recobrimentos paralelos, isso porquê essa sobreposição é necessária para criar gradientes que indicam a direção do movimento relativo dos alvos na detecção automática de pontos. Ainda segundo o autor, para melhores resultados na aquisição o sensor deve ter resoluções superiores a 12MP, velocidade de disparo superior a 1/1000, balanço de branco e deve-se monitorar as quantidades de luz solar e nebulosidade para que se tenham condições homogêneas durante o recobrimento. São importantes para um recobrimento mais eficiente monitorar condições de vento e tempestades eletromagnéticas. Um último fator diz respeito a altitude e o padrão

imageado, caso não existam feições no terreno suficientes para uma distribuição homogênea de pontos identificados automaticamente é indicado o uso de marcas pré-sinalizadas afim de criar artificialmente detalhes pela área a ser imageada.

Uma boa prática é a definição do plano de voo em escritório tendo em vista um reconhecimento prévio de obstáculos e riscos na região a ser recoberta. São necessárias identificação de áreas propícias a pouso e decolagem do RPA, posicionamento do operador para uma operação em linha de visada visual, comunicação dos horários da operação para pessoal exposto ao risco de queda. Neste estudo trataremos os termos VANT, ARP, RPA e Drones como expressões que na maioria das vezes querem se referir aos sistemas aéreos não tripulados.

2.3.2 Pontos de controle

Existem VANTs que possuem em seu sistema embarcado um receptor GNSS de navegação, que é responsável por executar a missão programada em escritório e gravar a posição onde cada imagem foi tomada. Porém, a precisão de um receptor GNSS de navegação fica em torno de 5 a 10 metros, isso significa que um ponto coletado por este receptor, quando verificado no terreno, pode estar em um raio de 5 a 10 metros, ou seja, ele possui um erro de 5 a 10 metros em relação ao terreno. Dessa forma, precisam-se ser utilizados pontos de controle, com o objetivo de aumentar a acurácia do mapeamento. Os pontos de controle utilizados neste trabalho constaram em alvos distribuídos ao longo do cenário experimental. Os pontos de controle por se tratarem de feições bem definidas na imagem e no terreno, ou seja, cujas coordenadas são conhecidas, estes podem ser extraídos por meio de levantamento em campo por topografia, de acordo com a resolução espacial da imagem a ser corrigida (SILVA, 2000a).

Para os pontos de controle, além dos pontos pré-sinalizados, podem ser escolhidos detalhes que estariam visíveis na imagem como no terreno, como por exemplo o canto de uma faixa de estacionamento, o canto de uma esquina, enfim, intersecções visíveis. Com isso o projeto ganha uma velocidade maior em sua execução, já que é possível iniciar a coleta dos pontos de controle com grande antecedência ao voo ou até após a execução do voo, já que estes alvos naturais, de antemão, não serão removidos do solo.

Com os valores das coordenadas dos pontos de controle, é utilizado o software de pós-processamento para encontrar os alvos nas imagens e introduzir as coordenadas dos alvos coletadas em campo com receptor GNSS. O software utiliza estas coordenadas como referência em sua aerotriangulação, com isso ele transporta estas coordenadas para o restante dos pixels na imagem fazendo assim o processo de referenciar a imagem, dessa forma, cada pixel terá sua coordenada estabelecida, diante do processo de aerotriangulação.

Com a finalidade de apoiar o processamento e o aumento da precisão das imagens, alguns estudos têm sido desenvolvidos utilizando pontos de controle no apoio aogerreferenciamento e correção geométrica das imagens de VANT (podemos citar GALVÃO e ROSALEN, 2013; GAWSKI et al., 2013; BARRY e COAKLEY, 2013).

Destaca-se que pontos de controle são pontos cujas coordenadas são, preferencialmente, determinadas em campo através de métodos de posicionamento; na atualidade são utilizados métodos de posicionamento GNSS que garantam qualidade compatível com os objetivos propostos do voo. Por exemplo, o posicionamento relativo rápido estático permite atingir à qualidade de centímetros na determinação de coordenadas em campo (MONICO, 2008 apud GALVÃO e ROSALEN, 2013).

2.3.3 Modelo Digital do Terreno

Os modelos em perspectiva são conhecidos como Modelos Digitais do Terreno ("*Digital Terrain Model*" ou DTM), ou Modelos Digitais da Superfície ("*Digital Ground Model*", DGM). O termo Modelo Digital do Terreno é o mais utilizado. Segundo DOYLE (1978), tem origem em um trabalho de Charles L. Miller e colaboradores; no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, entre 1955 a 1960. Todas as expressões acima fazem referência à aquisição, processamento e utilização de dados digitais para a elaboração de modelos que representem, graficamente, o relevo da superfície terrestre. Doyle (1978) os definiu como arranjos ordenados de números, que reproduzem a distribuição espacial das características do terreno. Na maioria das vezes, essa distribuição é representada por um sistema de coordenadas retangulares ou pela latitude e longitude. A característica do terreno, geralmente referenciada, é o relevo estimado pela sua cota ou altitude. Além da elevação, podem ser incluídas, nos

modelos, muitas outras feições do terreno. Essas referem-se a tipo de solo, posse, valor da propriedade, profundidade do leito da rocha matriz, uso da terra e outros. Daí, surgiu a expressão Modelo Digital de Elevação ("*Digital Elevation Model*", DEM), para se referir aos modelos que consideram, como característica do terreno, somente a elevação. Mikhail et al. (1978) consideram os modelos de elevação como subconjuntos dos modelos digitais do terreno.

Para criação do Modelo Digital do Terreno (MDT), tem-se como primeira etapa a seleção e a filtragem das fotografias. A seleção é realizada manualmente, antes das fotografias serem adicionadas à ferramenta computacional, excluindo aquelas que apresentaram problemas de qualidade decorrentes da inclinação da aeronave no momento da tomada da fotografia (fotografias inclinadas); da variação da altitude do drone entre tomadas consecutivas (escala); e da deriva da mesma provocada pelo vento (arrasto). No processamento seguem-se as etapas de alinhamento das tomadas, otimização do alinhamento, construção de uma nuvem densa de pontos, construção de um modelo poligonal de interpolação (*poligonal mesh model*), edição da geometria, construção de modelo digital de elevação, texturização e ortomosaico. (PEREIRA, 2017).

No alinhamento das tomadas são detectados pontos homólogos entre as regiões de sobreposição das imagens criando uma nuvem esparsa de pontos e estimada a posição de cada tomada do recobrimento da área. Os parâmetros utilizados nesse estágio são grau de acurácia na definição dos pontos homólogos, modo de seleção de pares (para os casos de se ter ou não posições aproximadas nas tomadas) e quantidade limite de pontos candidatos ou chave e de ligação de faixas. O limite de pontos candidatos indica quão fina será a varredura na imagem para busca de pontos individualizados que serão utilizados como candidatos para pontos homólogos nos modelos e entre faixas do bloco de recobrimento. (PEREIRA, 2017).

A construção da nuvem densa de pontos, é a etapa de densificação dos pontos fotogramétricos onde são refinados os parâmetros de posição da câmera no instante da tomada de cada imagem e são calculados a partir da nuvem esparsa uma nuvem densa de pontos. Nessa etapa pode-se lançar mão da identificação de pontos de apoio com coordenadas conhecidas eles auxiliam o refinamento do georreferenciamento do bloco de recobrimento, são parâmetros do algoritmo a definição fina ou grosseira da nuvem e o filtro de profundidade que faz menção a capacidade de identificação de padrões mais complexos intra texturizados. (PEREIRA, 2017).

No que diz respeito a geração de um MDT a partir de um estereomodelo orientado, de acordo com Schenk (1996), é necessário realizar três etapas, sendo descritas da seguinte forma:

1. Correspondência de imagens: Esta etapa consiste em localizar pontos homólogos, sendo denominada também de correlação de imagens, uma vez que, permite encontrar pontos homólogos em pares de imagens;
2. Ajuste da Superfície: Diz respeito a interpolação de pontos para que a superfície seja representada de forma correta;
3. Controle de Qualidade: Caracteriza-se por ser a verificação e edição do MDT. Esta etapa é de fundamental importância, pois os MDT's gerados de forma automática ainda necessitam de edição.

A formação do modelo poligonal de interpolação diz respeito a operação que constrói a geometria da superfície baseado na construção de faces a partir dos pontos da nuvem densa. Esse modelo pode ser editado excluindo faces criadas equivocadamente e preenchendo buracos derivados da oclusão de detalhes ou da retirada de obstáculos. O Modelo digital de elevação pode ser criado do modelo poligonal de interpolação ou diretamente da nuvem densa de pontos para exportação. Ele também pode ser texturizado com base no imageamento original ou no ortomosaico derivado da ortoretificação do recobrimento do bloco.

2.3.4 Ortofotocarta Digital

A Ortofotocarta Digital é um produto cartográfico considerado geometricamente equivalente a uma carta topográfica que, além de traços, disponibiliza a representação da imagem ortoretificada da área mapeada. Este produto é obtido por meio de um processo conhecido como retificação diferencial, para o qual é fundamental um bom MDT, que permite a correção de algumas distorções da imagem. Sendo assim, a projeção central ou perspectiva da fotografia é transformada em projeção ortogonal, corrigindo-se principalmente as distorções causadas pelo deslocamento devido ao relevo e pela inclinação da câmara. (MIKHAIL et al., 2001), figura 19.

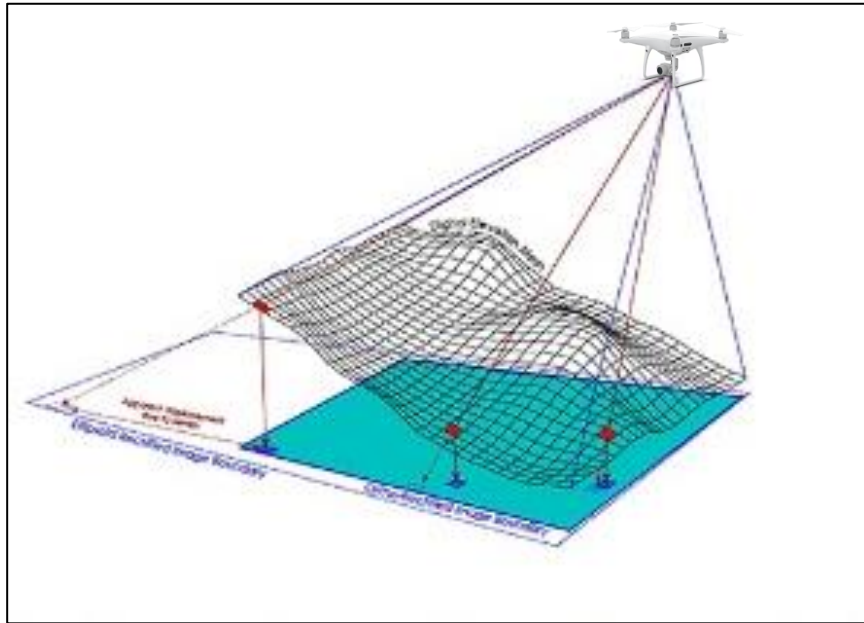


Figura 19—Ilustração do processo da ortoretificação de imagens.
Fonte:MIKHAIL ET AL, 2001.

De acordo com Andrade (1998), para construir uma ortomagem a partir de uma imagem digital, há que se considerar um novo arranjo dos pixels, uma vez que as coordenadas resultantes da ortoretificação não se ajustam à malha regular da ortomagem e um processo de interpolação deve ser aplicado para resolver este problema.

Segundo Arruda e Hasegawa (2000), adaptado de Almeida (1989), o princípio da produção de ortofoto digital consiste em transferir tons de cinza de uma imagem aérea digital para uma malha fina e regular, que representa a projeção ortogonal do terreno, ou seja, as coordenadas planas da ortofoto. Para isto são necessários: a imagem digital da área, os valores das orientações interior e exterior e o modelo digital do terreno na forma de uma malha regular, figura 20.

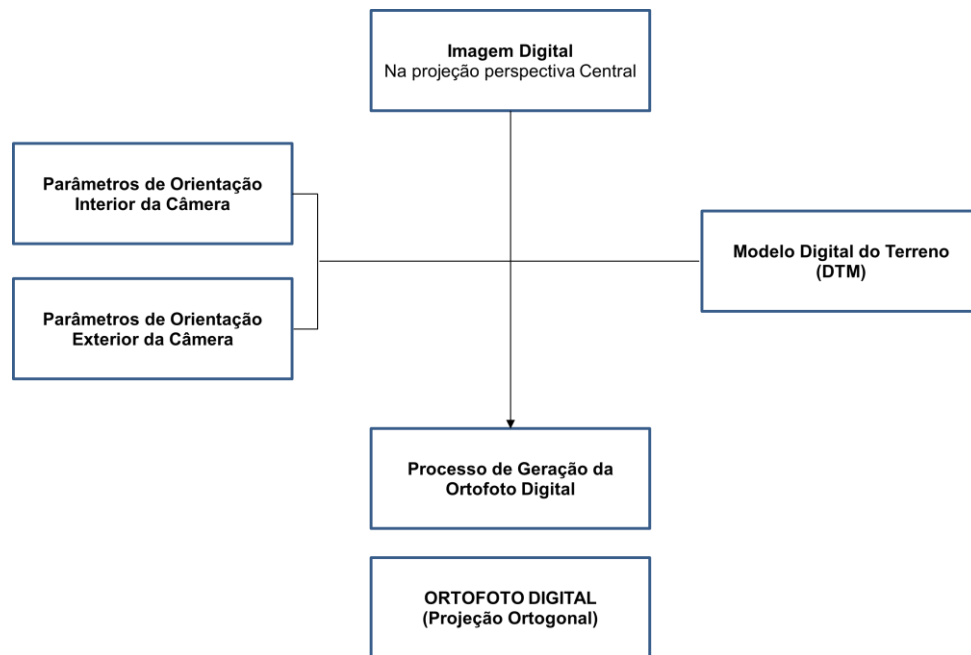


Figura 20—Ilustração do processo de geração da ortofoto digital
Fonte: Elaborado pelo autor

A produção de ortofoto digital pode ser realizada através de dois métodos: direto e indireto.

O método direto consiste, inicialmente, em projetar os pixels da imagem de entrada para a ortofoto digital aplicando-se as correções de erros sistemáticos através da equação de colinearidade inversa, gerando uma malha irregular no referencial da ortofoto digital.

Dados os elementos de rotação e de translação de uma imagem no espaço: κ, ϕ e ω , e X_{CP} , Y_{CP} e Z_{CP} , respectivamente, pode-se projetar as coordenadas do espaço imagem para o espaço objeto, desde que a coordenada Z seja conhecida, usando a equação de colinearidade inversa:

$$x = X_{CP} + (Z - Z_{CP}) \cdot \frac{r_{11}x_p + r_{21}y_p - r_{31}f}{r_{13}x_p + r_{23}y_p - r_{33}f} \quad (11)$$

$$Y = Y_{CP} + (Z - Z_{CP}) \cdot \frac{r_{12}x_p + r_{22}y_p - r_{32}f}{r_{13}x_p + r_{23}y_p - r_{33}f}$$

Onde: x_p e y_p são as coordenadas dos pontos no espaço imagem;

F é a distância focal da câmera;

X , Y e Z são as coordenadas do ponto no espaço objeto;

r_{ij} são os elementos da matriz de rotação;

X_{CP} , Y_{CP} e Z_{CP} são as coordenadas do CP da câmera.

Pode-se, então, identificar três etapas no método direto (ALMEIDA, 1989):

- Transformação do referencial da imagem digital para o referencial fotogramétrico;
- Transformação do referencial fotogramétrico para o referencial da ortofoto digital;
- Reamostragem da malha da ortofoto digital.

Já o método indireto consiste, inicialmente, na busca dos pixels da ortofoto digital na imagem digital original, através da equação de colinearidade direta, e um processo “inverso” de correção de erros sistemáticos. Em outras palavras, é necessário introduzir todos os erros sistemáticos para encontrar, na imagem bruta de entrada, a posição correta do ponto projetado. Posteriormente, é necessário aplicar algum método de interpolação de tons de cinza, pois os pixels da malha regular da ortofoto digital, não necessariamente, possuem posição correspondente ao centro de um pixel na imagem de entrada, IDOETA (2007).

Este método é, portanto, composto por três etapas:

- Transformação de pixels do referencial da ortofoto digital para o referencial fotográfico;
- Transformação do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital, utilizando-se a posição altimétrica do ponto na ortofoto através do MDT;
- Reamostragem radiométrica.

O método indireto realiza, em relação ao método direto, um processo inverso para transferência dos tons de cinza da imagem de entrada para a ortofoto digital.

A segunda etapa deste método corresponde à primeira etapa do método direto, só que agora é realizado no sentido “inverso” permitindo a transformação dos pixels projetados do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital.

A terceira etapa deste método consiste na reamostragem dos pixels da ortofoto digital. As transformações geométricas utilizadas para as mudanças de sistemas de coordenadas no método indireto, podem ser realizadas de duas maneiras: Ponto por Ponto (“*Pixel by Pixel*”); Pontos Âncora (*Anchoir Points*), IDOETA (2007).

No método ponto por ponto, a densificação do MDT de uma malha pouco densa, para uma malha que coincida com cada posição da ortofoto, é realizada antes

dos cálculos da equação de colinearidade e da transformação afim, fazendo com que todos os cálculos sejam realizados para todas as posições da ortofoto. Já na transformação geométrica por Pontos Âncora, os cálculos que envolvem a equação de colinearidade e a transformação afim, são realizados apenas nos Pontos Âncora, onde, estes são pontos que delimitam uma célula da malha regular pouco densa do MDT. Os valores para cada posição do MDT são interpolados em seguida, economizando assim grande esforço computacional, IDOETA (2007).

2.3.5 Structure from Motion (SfM)

O Structure from Motion (SfM) é um dos principais algoritmos utilizados nos softwares de equipamentos VANT. De acordo com Paoli e Trindade (2015) o SfM permite realizar a extração de feições tridimensionais (3D) a partir de imagens estáticas obtidas em duas dimensões (2D). Dessa forma, a partir de um conjunto de fotografias de uma determinada área, processadas por meio de um software específico, é possível obter uma estrutura 3D dos alvos capturados.

De acordo com Szeliski (2010), os algoritmos SfM, permitem com que ocorra a reconstrução da cena de captura de forma tridimensional e do movimento da câmera, por meio de uma série de imagens bidimensionais obtidas ao realizar movimentações em torno da cena, permitindo que as imagens sejam alinhadas.

Westoby et al. (2012) afirmam que, a diferença característica relacionada ao uso do algoritmo SfM em relação a Fotogrametria clássica, diz respeito ao fato deste não necessitar de uma especificação inicial de uma série de dados de coordenadas 3D conhecidas em relação a cena capturada, posição das câmeras e as suas orientações. Sendo assim, estes dados são resolvidos de forma simultânea, por meio de um processo iterativo, com alta redundância de ajuste de conjunto que se fundamenta em uma base de dados extraída automaticamente a partir de imagens sobrepostas.

O emprego da técnica de Structure from Motion (SfM), que pode-se traduzir de forma livre como “Estrutura pelo Movimento”, para a determinação de um modelo de superfície do terreno. A técnica consiste na tomada de duas ou mais fotos de uma cena a partir de pontos de vistas diferentes. Tais fotografias podem ser tomadas a partir do solo ou de veículos aéreos. A partir de pontos característicos coincidentes de determinada cena, capturada em visadas distintas, são realizados cálculos para a reconstrução tridimensional do terreno mediante triangulações. A fundamentação

técnica do SfM reside, em parte, no teorema de SfM de Ullman (1983), o qual anuncia que “para transformações rígidas, uma reconstrução métrica única é possível a partir de três visadas ortogonais de quatro pontos”.

A reconstrução 3D por meio da técnica de SfM pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Determinação de inúmeras feições características em cada imagem;
- Identificação dos emparelhamentos (*matching*) de feições correspondentes;
- Determinação de uma estimativa inicial da estrutura da cena e a movimentação relativa da câmera;
- Otimização das estimativas;
- Calibração da câmera;
- Adensamento da nuvem de pontos (*dense cloud*);
- Geração do modelo tridimensional por meio de rede triangular.

Na primeira etapa, em que geralmente se utiliza o algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), pontos chaves são detectados na imagem e descritos por sua localização, escala, orientação e por um vetor de identificação. Na segunda etapa, os pontos determinados na etapa prévia e que correspondem ao mesmo objeto real em diferentes imagens são pareados. Na terceira etapa é realizado o ajuste fino das matrizes de projeção e pontos tridimensionais estimados inicialmente, num processo iterativo e que estima a geometria tridimensional do objeto de estudo. A calibração da câmera é uma atividade obrigatória, uma vez que o SfM se baseia no uso de imagens capturadas por câmeras não calibradas. Assim, são determinados os parâmetros para correção de erros referentes à distorções radiais, distorções tangenciais, distância focal e posição do ponto principal de cada foto. Para otimização da estrutura tridimensional resultante, pode-se ainda adensar as nuvens de pontos obtidas através do SfM. A partir de tais pontos, é criada a superfície do modelo 3D, possibilitando o seu uso para diversos fins, entre eles, o cálculo de volume.

2.3.6 Regulamentação Brasileira para voos não tripulados

De acordo com Furtado et al. (2008) a integração de VANTs no atual cenário da aviação civil ainda possui muitas limitações de acordo com a regulamentação seguida, atrelada a vaga experiência profissional para operar o mesmo.

No Brasil, a portaria da defesa normativa nº 606, de 2004 apresenta diretrizes para a obtenção de veículos aéreos não tripulados e as suas providências. Pegoraro (2013) apresenta as instruções utilizadas no manual do usuário fornecido no drone *mdCockpit* utilizado em seu trabalho, acerca de recomendações para o uso do mesmo em algumas áreas, dentre elas podem ser extraídas as seguintes informações:

- Calcular cuidadosamente o tempo de voo e o tempo necessário para pousar;
- Não voar nas proximidades dos aeroportos, instalações militares ou outras fontes de fortes emissões eletromagnéticas. Permanecer pelo menos a cinco quilômetros de aeroportos;
- Não voar perto de redes elétricas e de pessoas;
- Antes de realizar a decolagem, certificar-se se as hélices estão apertadas. Uma fixação de forma incorreta pode causar correntes de ar que aumentam muito o consumo da bateria e, assim, reduzir o tempo de voo;
- Iniciar o voo com a bateria plenamente carregada;
- Evitar descer em linha reta, especialmente verticalmente. Descer em espiral ou fazendo “zig-zag”. Em uma descida vertical direta, o drone pode se desestabilizar ao se aproximar do chão.
- Ao precisar voar sobre a água, não se deve começar diretamente sobre a água, e sim manter sempre uma altura de pelo menos cinquenta metros acima da superfície.

No que diz respeito ao Brasil, a Instrução Suplementar (IS) nº 21/2012 – Revisão A da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2012) considera como sendo VANT, os protótipos que operem a uma altura maior que 121,92 metros acima da superfície terrestre ou além da linha que corresponde ao campo de visão, mesmo que esteja abaixo desta altura. Deve-se considerar também, o peso máximo de decolagem sendo este 25kg, mesmo que esteja operando em uma linha de visada visual e abaixo de 121, 92 metros.

Luz (2015) ainda afirma que as classificações já aceitas a respeito dos VANT's, levam em consideração os seguintes aspectos:

- Peso máximo de decolagem;
- Autonomia Operacional;
- Distância;

- Altura máxima de voo;
- Energia de impacto no solo.

No que se diz respeito a regulamentação dos voos, nenhum VANT civil tem a permissão de operar em território nacional sem a autorização da ANAC, do departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e determinados órgãos regulares, sendo um deles referente ao Ministério da Defesa.

No Brasil, existem atualmente três documentos oficializados que abordam sobre a regulamentação dos VANT's no Brasil, sendo estes:

- a) Circular de Informações Aeronáuticas – AIC nº 21/10 – DECEA Setembro/2010: tal circular tem como finalidade estabelecer as informações necessárias para o uso de veículos aéreos não tripulados no Brasil;
- b) Decisão nº 127 – ANAC, Novembro/2011: autorização para operação aérea de Aeronave Remotamente Pilotada do Departamento de Polícia Federal;
- c) Instrução Suplementar nº 21-002 - Revisão A - ANAC, Outubro/2012: Orienta aplicação da seção 21.191 do RBAC 21 (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil) para emissão de CAVE (Certificado de Autorização para Voo Experimental) para SISVANT de uso experimental (pesquisa e desenvolvimento, treinamento de tripulações e pesquisa de mercado).

As liberações relacionadas a regulamentação do uso de VANT's para fins comerciais ainda tem sido alvo de discussões por parte da ANAC, apresentada neste item. O encontro mais recente realizado para debater tais aspectos foi realizado em 04 de abril/2017. Contudo, ainda não houve um parecer sobre o uso do VANT para estas finalidades, sendo solicitado um período maior para análises quando a viabilidade deste equipamento para tais objetivos.

O artigo 21, inciso XII, alínea “c”, da Constituição da República dispõe que compete a União explorar diretamente ou mediante autorização, permissão ou concessão a navegação aérea. O conceito navegação aérea abarca diversas atividades, sendo que a competência da União - Comando da Aeronáutica (COMAER) - Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) é no tocante a prover a segurança da navegação aérea.

Tal dispositivo constitucional é regulamentado pelo Código Brasileiro de

Aeronáutica (CBA), Lei 7.565/1986, que apesar de ser anterior a nossa Constituição de 1988, foi por ela recepcionado, ou seja, está em vigor.

A Lei Complementar 97/1999 regulamenta tal dispositivo constitucional e, no seu artigo 18, inciso II e parágrafo único, trata da competência da União-COMAER - DECEA para prover a segurança da navegação aérea.

A Lei que criou a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Lei 11.182/2005, retirou algumas competências do COMAER previstas no CBA e as repassou àquela Agência. Todavia, a referida norma preservou e ressaltou a competência da União-COMAER - DECEA para o controle do espaço aéreo brasileiro, notadamente em seu artigo 8º, inciso XXI, parágrafo 2º e 6º.

Por fim, o Decreto 6.834/2009 aprova a estrutura regimental do COMAER, tratando da competência do controle do espaço aéreo no seu artigo 1º; artigo 3º, incisos XIV, XV e XVI; artigo 4º, inciso IV, alínea 'e'; e artigo 19, entre outros.

A Agência Nacional da Aviação Civil (Anac), em 3/5/2017, editou o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E), que trata das exigências de competência da Anac para aeronaves não tripuladas.

Mas, como dito no preâmbulo desse ato administrativo, “devem ser observadas as regulamentações de outros entes da administração pública direta e indireta, tais como a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA e o Ministério da Defesa”.

Os requisitos para pilotar um drone variam. O piloto remoto deve ter, pelo menos, 18 anos. Não há necessidade de habilitação se o veículo pesar até 25 kg, mas, a partir daí, devem estar cadastrados no site da Anac. Se o voo sobrepujar 400 pés (em torno de 121,92 metros), será necessária licença e habilitação. Não se permite proximidade de 30 ou menos metros das pessoas. Vejamos, agora, a responsabilidade pelo descumprimento das normas. No âmbito administrativo, o artigo 289, da Lei 7.565/86, explicita que a ofensa aos seus dispositivos ou às leis complementares importará em pena de multa, suspensão ou cassação de certificados, licenças, concessões ou autorizações, detenção, interdição ou apreensão de aeronave ou interdição da empresa.

No caso de aeroportos, é possível valer-se do artigo 261 do Código Penal, que pune com 2 a 5 anos de reclusão expor a perigo aeronave ou praticar qualquer ato tendente a impedir ou dificultar navegação aérea. Na Lei das Contravenções Penais, o artigo 33 prevê a contravenção de dirigir aeronave sem estar devidamente licenciado, fixando a pena de 15 dias a 3 meses de prisão simples. Uma sanção, evidentemente, simbólica. Do ponto de vista civil, a responsabilidade se resolve com base no artigo 927 e seguintes do Código Civil.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo está situada na Universidade Federal da Bahia (UFBA), que é uma instituição de ensino superior pública brasileira, com sede na cidade de Salvador. Compreende duas regiões distintas, onde os voos foram realizados. Tais regiões ficam dentro de uma área que compreende a Poligonal UFBA, região de aproximada de 79.000 m², como mostra a figura 21.

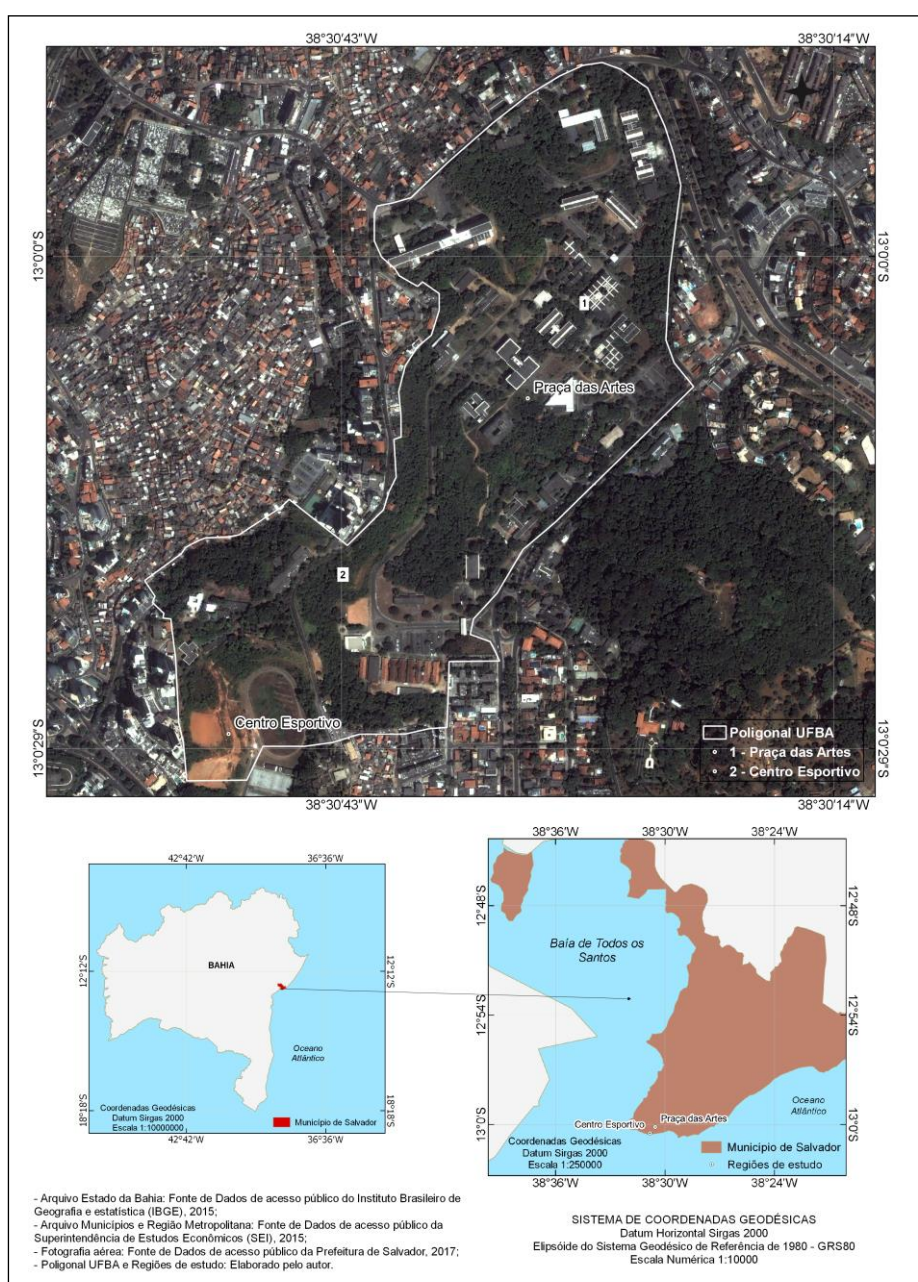


Figura 21– Localização da área de estudo.

Fonte:Elaborado pelo autor

A região 1 está localizada na Praça das Artes, região central do Campus de Ondina, conforme visto na figura 22:



Figura 22– Localização da região de estudo 1
Fonte:Elaborado pelo autor

A região de estudo 2 está localizada no Centro Esportivo da UFBA, quadra de esportes, na Escola de Educação Física da referida instituição, figura 23:



Figura 23– Localização da região de estudo 2
Fonte:Elaborado pelo autor

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

Neste estudo foram utilizados softwares e equipamentos do Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto do Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (UFBA), nos quais também são pertencentes as licenças dos softwares:

- a) RPA DJI phantom 4 de asa rotativa: utilizado para obtenção das imagens da área;
- b) Estação Total Ruide RTS 862A;
- c) Receptores GNSS Ashtech ProMark 120, portadora L1, com bipé, bastão e uma trena;
- d) Software Topcon Tools v.7.5.1: software de pós-processamento onde será executado o transporte de coordenadas dos pontos de controle;
- e) Software Pix4D para realização do plano de voo;
- f) Software Agisoft PhotoScan 1.2.4: para processamento de imagens provenientes do Drone para gerar o modelo tridimensional (3D);
- g) Software DataGeosis: para processamento dos dados provenientes da Estação Total;
- h) Software ArcGis para modelagem dos dados provenientes dos voos na quadra de esportes da UFBA;
- i) Software Qgis para criação dos mapas.

4.2 Métodos

Foi utilizado o método experimental, pois as variáveis foram manipuladas de maneira preestabelecida e seus efeitos suficientemente controlados. Foi realizado um aprofundamento do referencial teórico relacionado ao tema, e assim desenvolvido uma metodologia de campo (plano de voo, avaliação de perímetro, pontos de controle) para obter os resultados satisfatórios. O Estudo de caso foi realizado em regiões de áreas pequenas, para que possíveis ajustes na metodologia fossem feitos. Após essa etapa, foram realizados voos na área de estudo. Em resumo, a metodologia empregada para a execução deste trabalho encontra-se descrita no fluxograma da figura 24. No estudo

preliminar foram realizadas visitas de reconhecimento para identificação de obstáculos, obstruções e local adequado para decolagem.

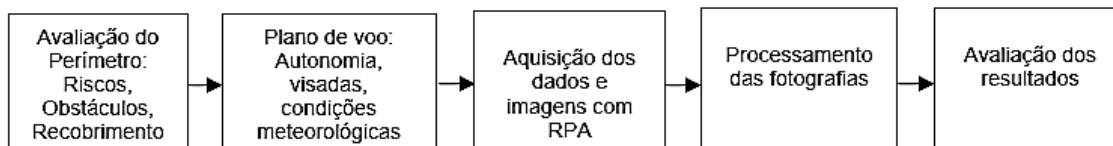


Figura 24 – Fluxograma dos métodos empregados no presente trabalho

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos valores obtidos em campo, permite-se com que sejam avaliadas as discrepâncias dos resultados volumétricos entre diferentes tecnologias, utilizando Modelagem Digital de Terreno (DTM) elaborado a partir de pesquisas utilizando VANT, e Estação Total como dados de referência em áreas de teste localizadas na região de estudo. Foram realizadas comparações entre os volumes, áreas, análises estatísticas, obtidos através dos modelos gerados com VANT e estação total, conforme destacados no fluxograma abaixo figura 25:

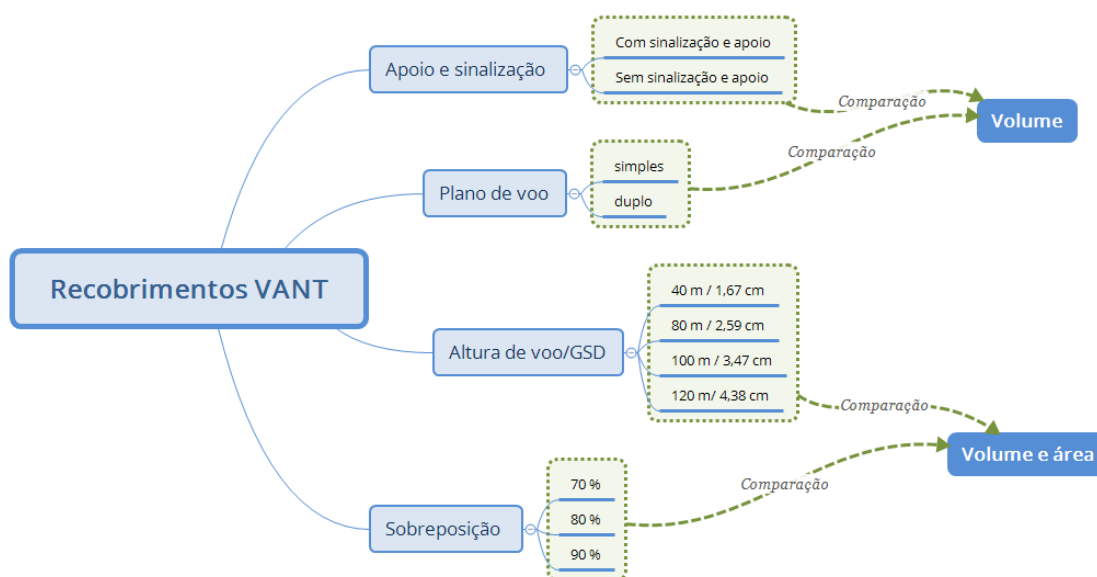


Figura 25 – Fluxograma sequenciando testes aplicados na execução dos voos

Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro e segundo testes, denominados, respectivamente, no fluxograma da figura 6, como TESTE 1e TESTE 2, foram realizados na região de estudo 1 (figura 26). Neles foram utilizados apoios (Pontos de controle), uma poligonal apoiada e sinalizaçõesutilizando fitas adesivas, formando linhas, para possivelmente melhorar a

correlação de imagens, através da melhor identificação de pontos homólogos. Também, nesses testes, foram utilizados dois tipos de planos de voo, o plano de aquisição de imagem de grade simples e o de grade dupla. Após os voos com o uso do VANT, as imagens foram processadas, gerando o Modelo Digital do Terreno e em seguida a Ortofoto Digital, sendo possível extrair informações de medidas de volume e comprimento para comparações com dados de referência obtidos através da Estação Total.

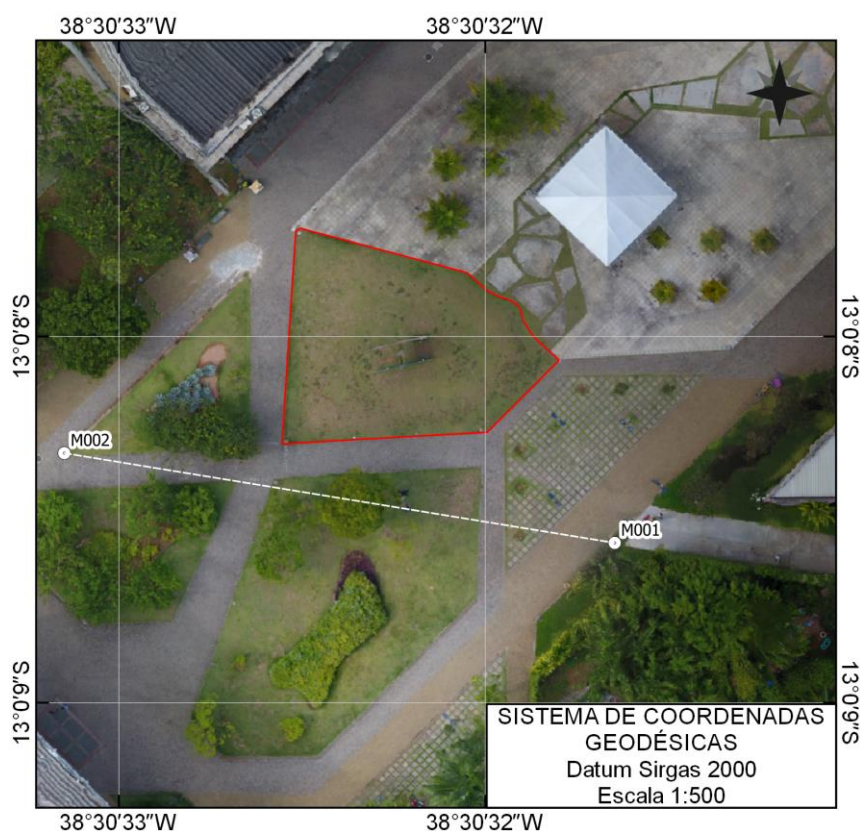


Figura 26– Ortofoto georreferenciada da região de estudo 1
Fonte: Elaborado pelo autor

No TESTE 3 foram alterados os parâmetros da altura de voo, variando o GSD da imagem gerada. Essa fase foi executada nas duas regiões de estudo, Praça das Artes (vista na figura anterior) e Centro Esportivo da UFBA (figura 27). Teve como objetivo comparações de volume e área entre os modelos obtidos com uso de VANT e Estação Total, bem como realização de testes estatísticos.

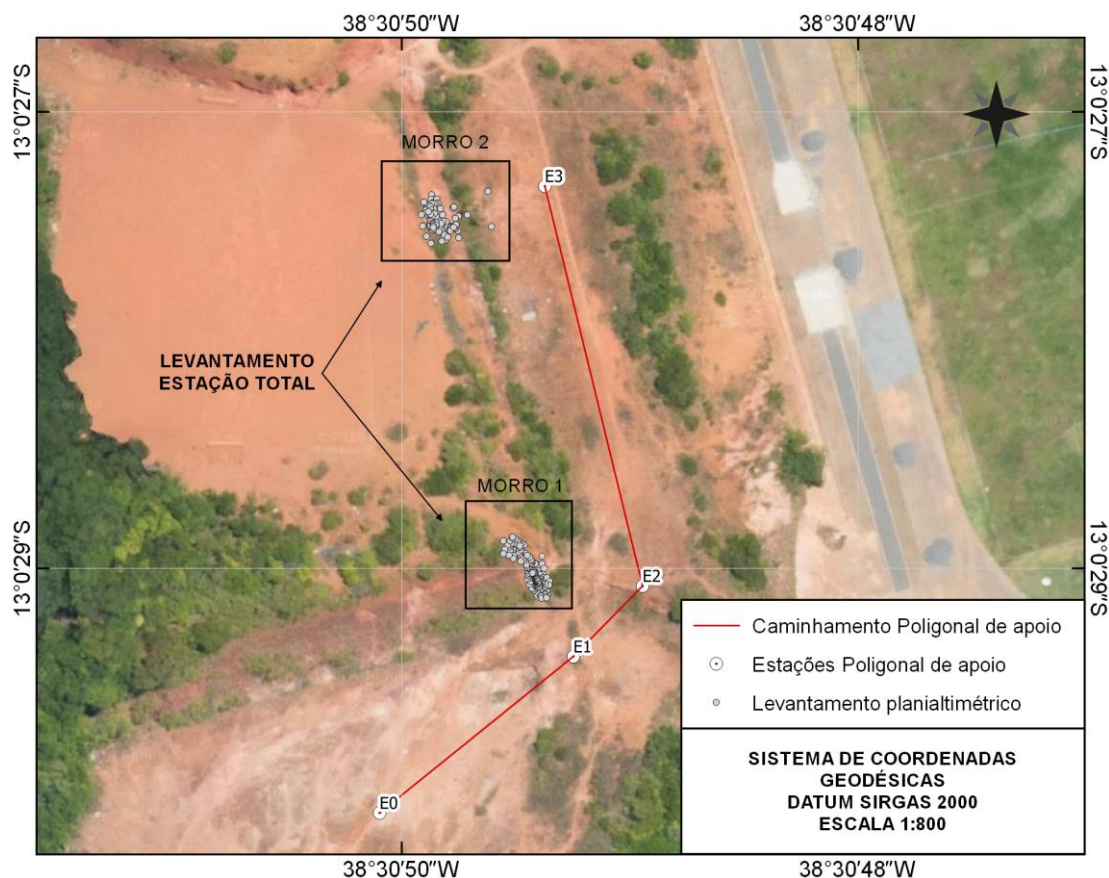


Figura 27 – Ortoreferenciada da região de estudo 2

Fonte: Elaborado pelo autor

O TESTE 4 foi realizado na íntegra na região de estudo 2 (Quadra de esportes), onde os parâmetros de sobreposição foram alterados, com objetivo de verificar se existe um padrão de variabilidade na diferença de volume e área entre os dados do VANT e Estação Total, bem como realização de testes estatísticos.

4.2.1 Cálculo de volume utilizando distanciômetro

O levantamento topográfico utilizando o distanciômetro, estação total, foi utilizado como dados de referência para efeito de comparação com os valores do levantamento utilizando o VANT nas regiões de estudo 1 e 2. A partir da poligonal de apoio, foram irradiados pontos na superfície de interesse. Para obtenção das coordenadas dos vértices da poligonal de apoio, foi utilizado o receptor GNSS ProMark 220, com as fases das portadoras L1 e L2, máscara de elevação de 15° e

taxa de gravação de 1s. Os valores das coordenadas encontradas serviu para correção diferencial das coordenadas dos vértices da poligonal apoiada. Uma vez demarcada a poligonal de apoio, o método da irradiação consistiu em localizar, estrategicamente, um ponto (P), nas superfícies demarcadas estrategicamente na região de estudo 1 e 2. Assim, foram medidas as distâncias aos pontos definidores da referida superfície, bem como, obtidas suas cotas em relação a estação posicionada no vértice da poligonal. A figura 28 ilustra o uso da estação total na região de estudo 2:



Figura 28—Ilustração da estação total na região de estudo 2
Fonte: IBGE. 2015.

A estação total utilizada foi da marca RUIDE, modelo 822, que tem como principais características: leitura direta de 1" e precisão de 9", alcance de 2.000 metros com 1 prisma e 2.700 metros com 3 prismas, precisão linear de 3mm + 3ppm, com compensador simples, coletor de dados interno com memória para 8.000 pontos com todos atributos ou 16.000 pontos de coordenadas e medição de pontos inacessíveis. O levantamento do terreno com estação total se faz pela medição dos pontos notáveis, descrevendo-os consoante o número de pontos topográficos levantados. A qualidade da determinação da superfície está diretamente ligada ao número de pontos levantados e a complexidade do terreno.

4.2.2 Planejamento do voo utilizando aeronave com Cálculo de volume utilizando aeronave com sensor embarcado

A fase de planejamento de voo envolve a definição da área a ser sobrevoada, sendo em seguida verificadas as condições necessárias para execução do voo, tais como fatores meteorológicos (vento e chuva), assim como iluminação. Para este trabalho não foi necessária solicitação de autorização de voo, ou solicitação de um NOTAM (acrônimo de "Notice to Airmen", que significa "Aviso aos Aeronavegantes") ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão ligado a Aeronáutica, pois a altura máxima de voo permitida (121,2m) foi respeitada. Com todas as condições de voo adequadas, foi realizado o plano voo, a ser executado pelo piloto automático do software Pix4D, bem como a pré-sinalização da área do sobrevoo, quando necessária. A pré-sinalização da área do sobrevoo consistiu em materializar em campo uma marcação artificial no terreno, possível de ser identificada nas fotografias aéreas, com o objetivo de proporcionar medições mais precisas das coordenadas dos pontos de apoio necessários para orientação das aerofotos obtidas pelo VANT.

São importantes para um recobrimento mais eficiente monitorar condições de vento e tempestades eletromagnéticas (foi utilizado o *software UAV Forecast* para este item). Um último fator diz respeito a altitude e o padrão imageado, caso não existam feições no terreno suficientes para uma distribuição homogênea de pontos identificados automaticamente é indicado o uso de marcas pré-sinalizadas afim de criar artificialmente detalhes pela área a ser imageada. Uma boa prática é a definição do plano de voo em escritório tendo em vista um reconhecimento prévio de obstáculos

e riscos na região a ser recoberta. São necessárias identificação de áreas propícias a pouso e decolagem do RPA, posicionamento do operador para uma operação em linha de visada visual, comunicação dos horários da operação para pessoal exposto ao risco de queda. A fim de obter resultados com menos interferências atmosféricas, as condições clima/tempo foram checadas para evitar o levantamento em horários e dias inviável a equipe. Por isso, foi escolhido um horário com o objetivo de evitar que as sombras provocadas pela inclinação do sol ofusquem detalhes da geometria. A figura 29 resume a metodologia empregada para planejamento de voo:

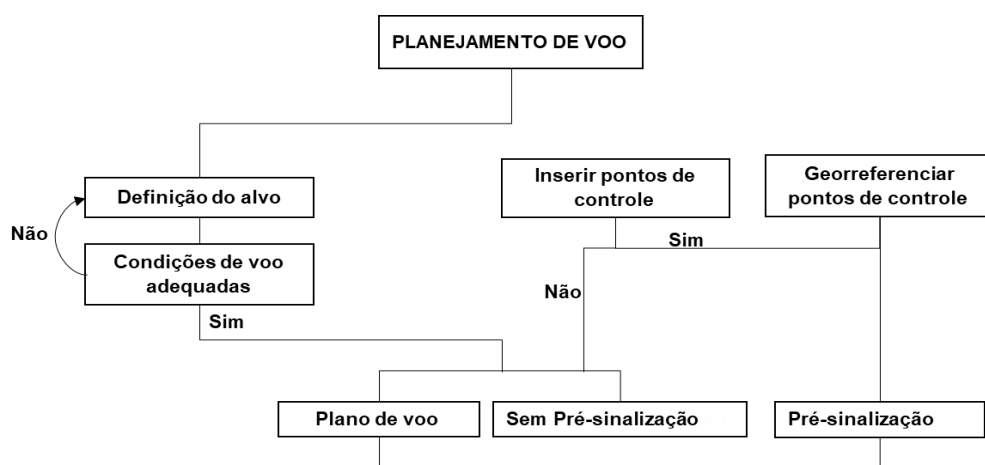


Figura 29 – Fluxograma de planejamento de voo empregado no presente trabalho
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Execução de voo e processamento

Os voos realizados com o ARP foram conduzidos em horários com boa visibilidade, com execução de dois tipos de linhas de voo, a do tipo grade simples e, no Teste 2, o de grade dupla (figura 30), com tomadas de fotos na direção vertical, como ilustrado na figura 31, utilizando o VANT multirrotor Phantom 4 da empresa DJI.

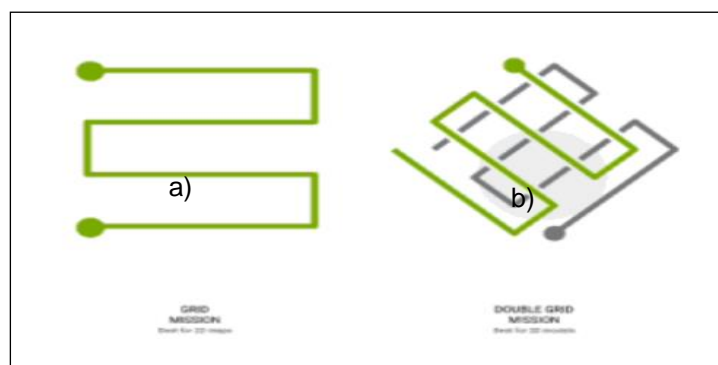


Figura 30 – Ilustração exemplificando o plano de voo de grade simples (a) e grade dupla (b).

Fonte: Software Pix4D

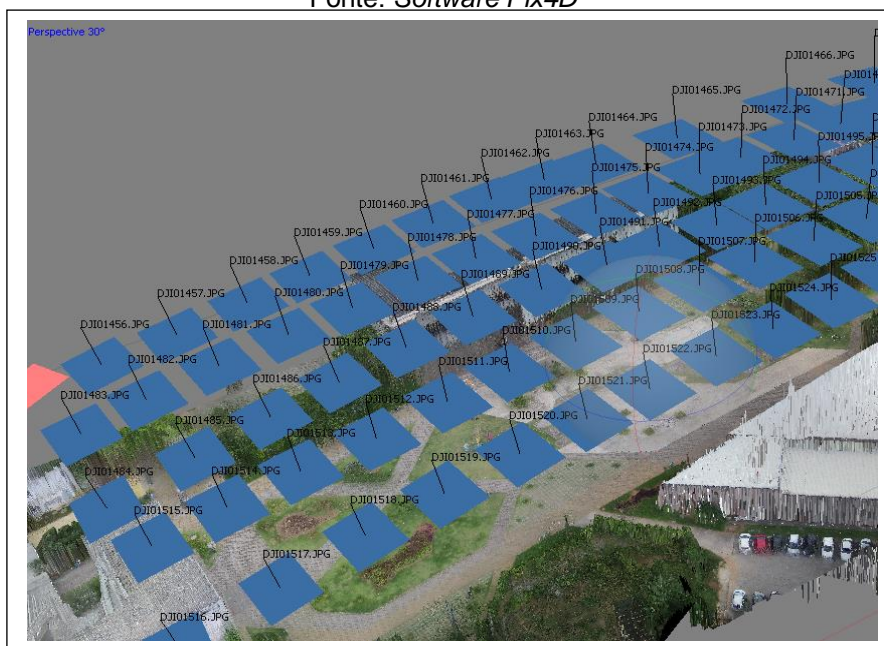


Figura 31 – Ilustração demonstrando a posição da câmera nas tomadas das fotos verticais
Fonte: Elaborado pelo autor

Com essa variação do plano de voo acima, buscou-se caracterizar geometricamente, e avaliar cada parâmetro pelo seu potencial de monitoramento e caracterização do fenômeno. Parâmetros que caracterizam a erosão: volume, área, comprimento, diferentes estruturas (cauda, corpo e cabeceira), classes de interesse no entorno (vegetação, uso do solo, corpos d'água, edificações).

Em laboratório foi realizado o processamento das imagens baseando-se SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) onde pontos são identificados e extraídos automaticamente das imagens e armazenados em banco de dados. Sucessivamente imagem a imagem o algoritmo identifica pontos homólogos em novas imagens comparando pontos candidatos aos correspondentes baseando-se na distância euclidiana dos vetores de posição. De acordo com Lowe (2004) o SIFT é composto por duas partes distintas: o detector e o descritor. O detector SIFT é baseado em cálculos de diferença Gaussianas e o descritor SIFT utiliza histogramas de gradientes orientados para descrever a vizinhança local dos pontos de interesse. Com pontos fotogramétricos identificados se realiza uma orientação absoluta com o uso do posicionamento do centro perspectivo de cada tomada. Esse processo foi realizado através do programa *PhotoScan 1.2.4*. As três etapas básicas do processamento com

o *Photoscan* foram: (1) calibração automática da câmera – com base nos dados do EXIF (Formato de arquivo de imagem intercambiável) das fotografias; (2) alinhamento das fotos – a partir dos pontos em comum entre as fotografias e pontos de apoio de solo; e (3) geração da nuvem de pontos – com base correlação de imagens, feita por meio de medições de similaridade entre as imagens sobrepostas, são identificadas as coordenadas tridimensionais (x, y, z) da superfície fotografada. Delimitada a região para o cálculo de volume, define-se um local e com a ferramenta de seleção delimita a área, e calcula-se o volume. A figura 32 sequencia de forma resumida o processamento dos dados:

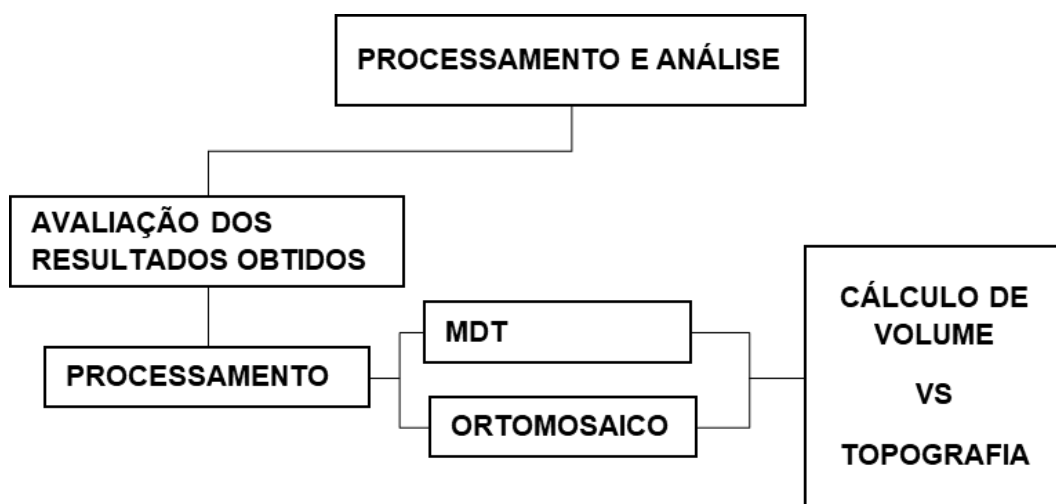


Figura 32 – Fluxograma sequenciando o processamento dos dados

Fonte: Elaborado pelo autor

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Região de Estudo 1

Para efeito de comparação de dados, foram utilizados como valores de referência os dados obtidos através do levantamento com Estação Total. É importante salientar que o tempo de coleta nessa etapa inclui o levantamento com receptor GNSS, utilizado para georreferenciar os pontos da poligonal. Foram levantados 160 pontos. O cálculo do volume foi executado no *softwareDataGeosis*, a partir da triangulação dos pontos da nuvem densa, que são ligados, de modo a construir uma malha de triângulos recorrendo a algoritmos de triangulação de delaunay, figura 33. Após a execução do cálculo de volume, chega-se ao valor de 189,99m³ para região 1, que se caracteriza como uma região que fornecerá um volume positivo, por se tratar de um morro. A área foi delimitada pela poligonal limítrofe que separa o morro do piso cimentado plano.

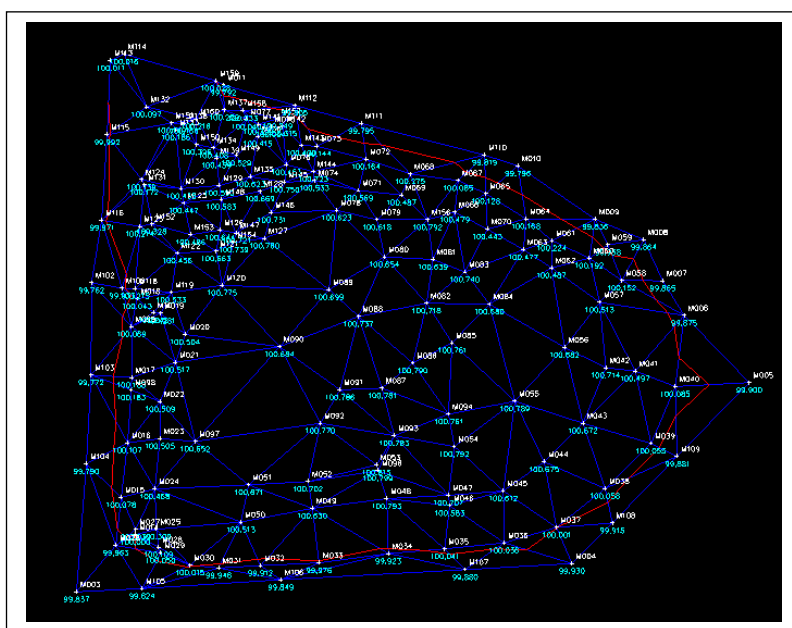


Figura 33 – Malha triangular, resultante do levantamento com estação total, da região de estudo 1

Fonte: Elaborado pelo autor

O cálculo do volume do produto gerado pelo VANT foi possível a partir da triangulação dos pontos da nuvem densa, que são ligados, de modo a construir uma malha de triângulos recorrendo a algoritmos de triangulação. Na região de estudo foram gerados aproximadamente 147 mil pontos por voo após a execução de voo

variando tipo de grade, inclusão ou exclusão de sinalização e pontos de controle no solo.

Para o cálculo de volume, a 40 metros de altura de vôo, utilizando o plano de aquisição de imagem de grade simples, sem pontos de controle e sem marcação sinalizada no solo, chega-se ao valor de variação percentual de 16,58%, quadro 6:

Quadro 6: Variação percentual do cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, a 40m de altura e sem marcação e pontos de controle em solo.

PLATAFORMA	QUANTIDADE DE PONTOS	VOLUME	VARIAÇÃO PERCENTUAL	TEMPO DE COLETA	TEMPO DE PROCESSAMENTO
DRONE	147000	162,966m ³	16,58%	25 MINUTOS	2horas
ESTAÇÃO TOTAL	160	189,990m ³		5 HORAS	35minutos

Fonte: Elaborado pelo autor

Com cálculo de volume, com voo duplo a 40 metros, e pontos de controle e marcação no solo, chega-se ao valor de variação percentual de 1,87%, quadro 7:

Quadro 7: Variação percentual do cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, com voo duplo, a 40m de altura e marcação e pontos de controle em solo.

PLATAFORMA	QUANTIDADE DE PONTOS	VOLUME	VARIAÇÃO PERCENTUAL	TEMPO DE COLETA	TEMPO DE PROCESSAMENTO
DRONE	147000	186,499m ³	1,87%	15 MINUTOS	2horas
ESTAÇÃO TOTAL	160	189,990m ³		5 HORAS	35minutos

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado para execução com o plano de aquisição de imagem de grade simples a 40 metros de altura de voo, e utilização de pontos de controle e sinalizando linhas de marcação no solo, chega-se ao valor de variação percentual de 0,28%, quadro 8:

Quadro 8: Variação percentual do cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, com voo simples, a 40m de altura e marcação e pontos de controle em solo.

PLATAFORMA	QUANTIDADE DE PONTOS	VOLUME	VARIAÇÃO PERCENTUAL	TEMPO DE COLETA	TEMPO DE PROCESSAMENTO
DRONE	147000	190,520m ³	0,28%	15 MINUTOS	2horas
ESTAÇÃO TOTAL	160	189,990m ³		5 HORAS	35minutos

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda na região de estudo 1 foram alterados os parâmetros da altura de voo, variando o GSD da imagem gerada. As alturas de vôo testadas foram 40m, 80m e 120m. Buscou-se com isso, verificar a influência da diminuição da nuvem densa de pontos (quanto maior a altura, menor a quantidade de pontos na nuvem densa) em relação a variação do volume e área de superfície do modelo digital, vide quadro 9:

Quadro 9: Variação percentual do cálculo do volume, realizadas com o RPA e Estação Total, com voo simples, a 40m, 80m E 120m de altura e marcação e pontos de controle em solo.

PLATAFORMA	QUANTIDADE DE PONTOS	VOLUME (m ³)	VARIÇÃO PERCENTUAL	ÁREA (m ²)	VARIÇÃO PERCENTUAL	TEMPO DE COLETA	TEMPO DE PROCESSAMENTO
ESTAÇÃO TOTAL							
	160	189,99		328,96		5 horas	35 minutos
DRONE							
100m	52600	149,99	0,21	322,65	0,02	6 minutos	12 minutos
80m	100300	151,67	0,20	323,67	0,02	9 minutos	22 minutos
40m	147000	183,21	0,04	337,30	0,03	15 minutos	35 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor

No quadro 10 foram calculados: a média, variância e desvio padrão. Esses dois últimos são medidas de dispersão que indicam a regularidade de um conjunto de dados em função da média aritmética.

Quadro 10: Análise estatística da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 1, Praça das Artes.

PRAÇA DAS ARTES VOO 40m			PRAÇA DAS ARTES VOO 80m			PRAÇA DAS ARTES VOO 120m		
MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR
0,01	0,28	0,08	-0,06	0,28	0,08	-0,06	0,29	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2. Região de Estudo 2

Também, nesta região, para efeito de comparação de dados, foram utilizados como valores de referência os dados obtidos através da Estação Total. A região foi dividida em dois grupos: MORRO 1 e MORRO 2, conforme visto na figura 8 anteriormente. É importante ressaltar que na região de estudo 2 o corpo de estudo serão duas ravinas, e serão avaliados os volumes negativos.

O tempo de coleta nessa etapa inclui o levantamento com receptor GNSS, utilizado para georreferenciar os pontos da poligonal. Foram levantados 204 pontos no MORRO 1 e 102 pontos no MORRO 2. O cálculo do volume foi executado no software ArcGIS, a partir da criação do Modelo Digital de Superfície TIN.

No experimento MORRO 1 foram alterados os parâmetros da altura de voo, variando o GSD da imagem gerada. As alturas de voo testadas foram 40m, 60m, 80m e 100m. Buscou-se com isso, verificar a influência da diminuição da nuvem densa de pontos (quanto maior a altura, menor a quantidade de pontos na nuvem densa) em relação a variação do volume e área de superfície do modelo digital.

O processamento de dados das análises de diferença de superfícies foi realizado através do software ArcGIS Desktop 10.5 com o suporte à extensão 3D Analyst.

A análise de diferença de superfícies consistiu em calcular a área superficial e o volume do sólido, computado da interseção entre o terreno e uma superfície de referência. Para todos os cenários analisados, utilizou-se o fluxograma de geoprocessamento representado na Figura 34.

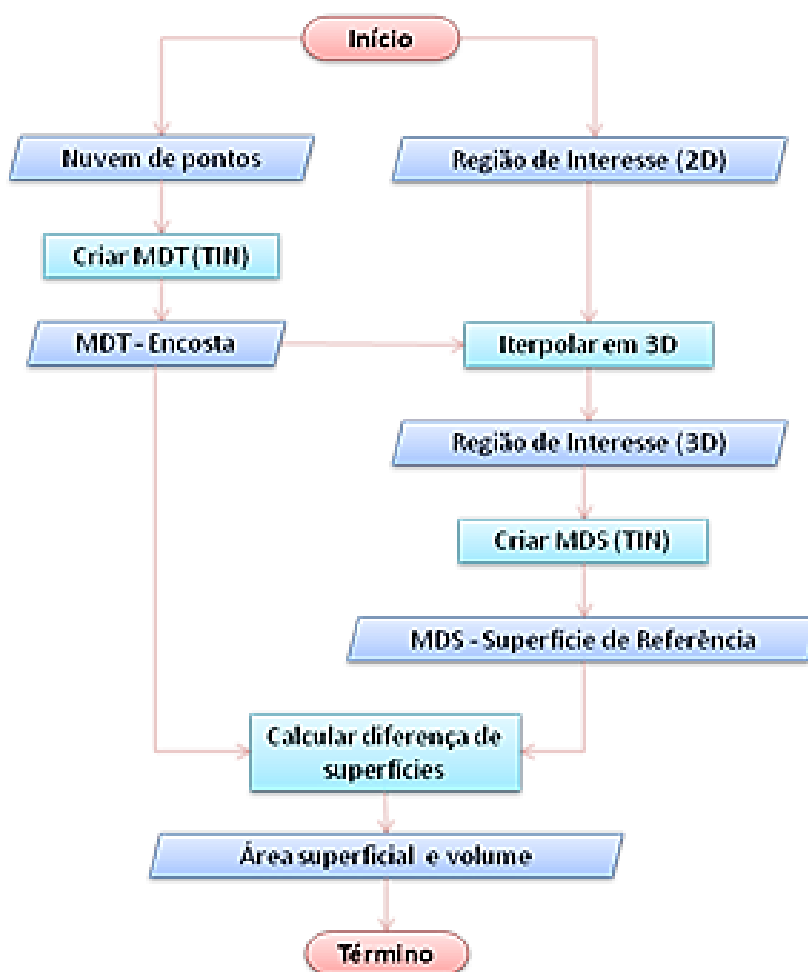


Figura 34 – Fluxograma de geoprocessamento para cálculo de área e volume

Fonte: Elaborado pelo autor

O processo tem como entrada o dado “nuvem de pontos”, que representa a amostragem de pontos planialtimétricos do terreno e o dado “Região de interesse (2D)”, polígono plano que delimita a região de interesse para a avaliação da área superficial e volume da ravina.

Inicialmente, criou-se o dado “MDT – Encosta”, que consistiu no modelo digital de terreno da encosta oriundo da nuvem de pontos planialtimétricos amostrados. Este processo foi realizado utilizando a ferramenta *Create TIN*. Em seguida, processou-se o dado “Região de Interesse 3D”, que consiste num polígono cujo valor da coordenada altimétrica de seus vértices tem como referência o modelo “MDT – Encosta”. Este processo foi realizado utilizando a ferramenta *Interpolate shape 3D*. Na sequência, processou-se o dado “MDS - Superfície de Referência” que consistiu na criação do modelo digital da superfície de referência, oriundo da triangulação dos vértices 3D do dado “Região de Interesse 3D”. Este processo foi

realizado utilizando a ferramenta *Create TIN*. Por fim, através da ferramenta *Surface Difference*, foi realizada a diferença entre as superfícies “MDT – Encosta” e “MDS - Superfície de Referência” cujo objetivo foi computar a área superficial e volume do sólido resultante da interseção entre esses dois modelos. A figura 35 representa o modelo gerado a partir dos pontos da estação total, que serão utilizados como referência do MORRO 1 e os pontos da estação total que serão utilizados como referência do MORRO 2:

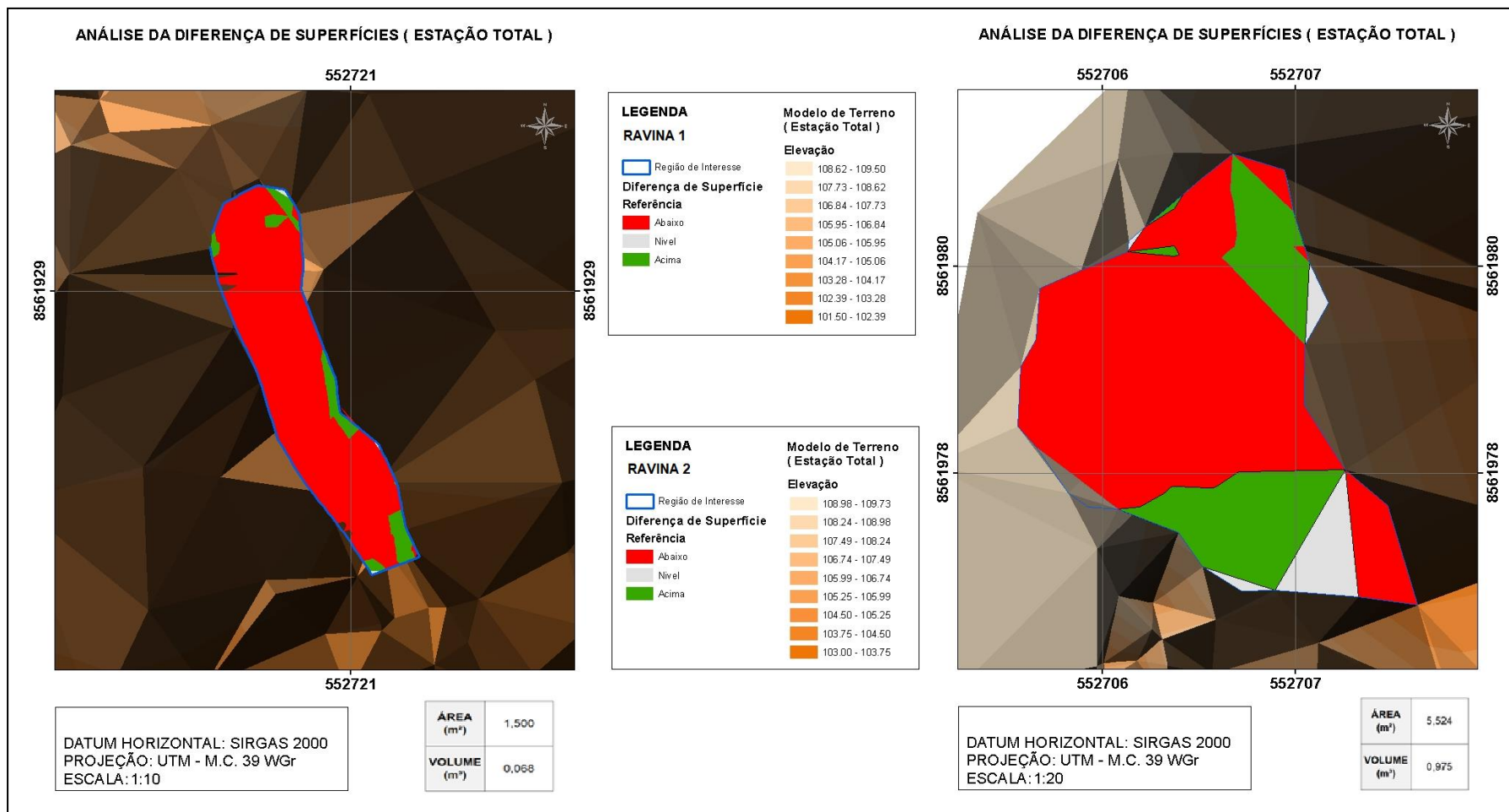


Figura 35 – Modelo digital para estação de dados de referência – Estação Total (Morro 1 e 2)

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura36 representa os modelos gerados a partir da nuvem de pontos provenientes do VANT com sobreposição longitudinal e transversal de 80%, respectivamente nas alturas, 40m, 60m, 80m e 100m do MORRO 1, com suas discrepâncias de área e volume:

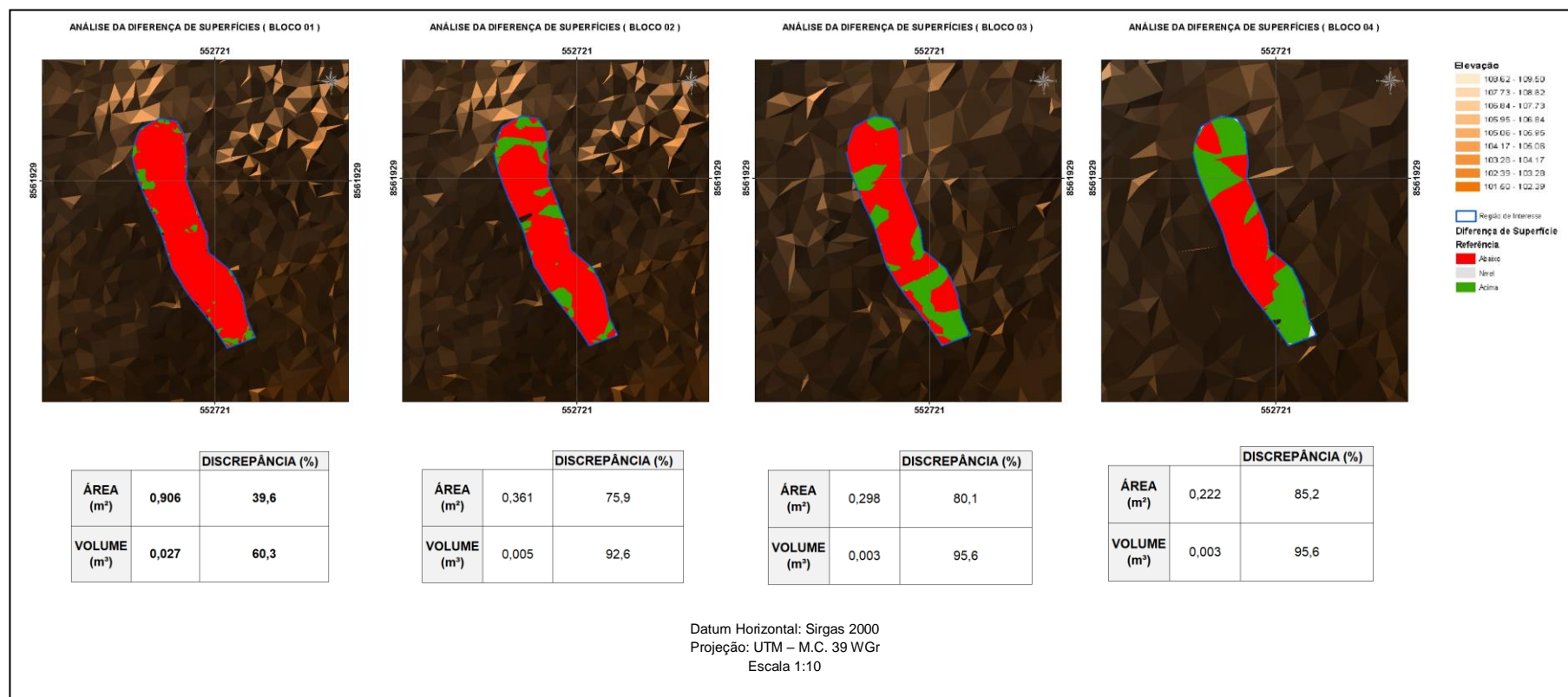


Figura 36 – Modelo digital extraído do VANT para análise de discrepância – (Morro 1)
 Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 37 representa os modelos gerados a partir da nuvem de pontos provenientes do VANT, respectivamente nas sobreposições 70%, 80% e 90% do MORRO 2:

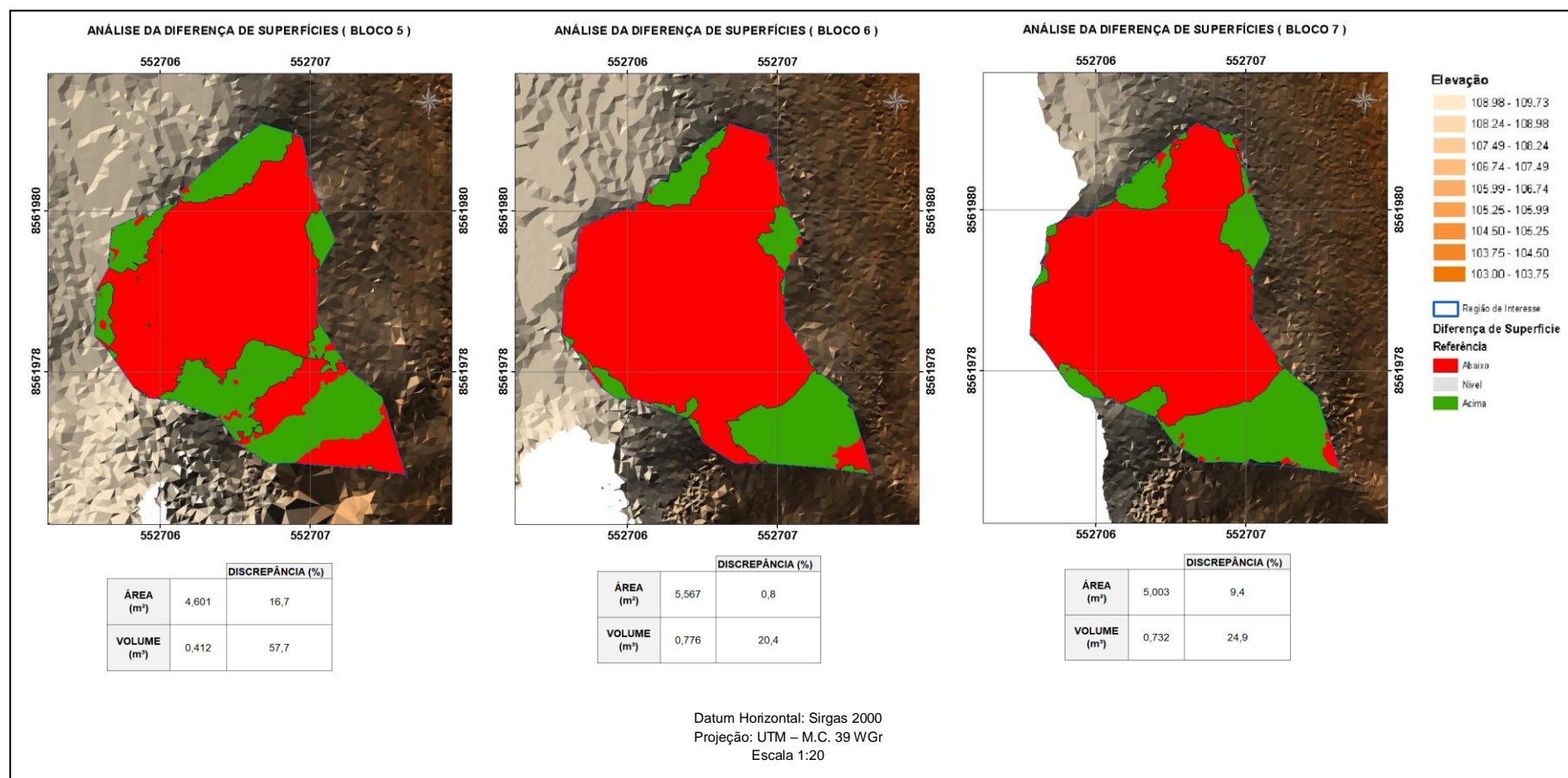


Figura 37 – Modelo digital extraído do VANT para análise de discrepância – (Morro 2)
 Fonte: Elaborado pelo autor

Os modelos apresentados a seguir na figura 38 referem-se à diferença de intensidade de pixel entre os rasters de declividade gerados pela estação total e o VANT nas quatro situações descritas anteriormente para a ravina localizada no MORRO 1. O ponto de coloração mais escura significa maior diferença de pixel e, também, regiões problemáticas no levantamento com VANT que ocasionou uma maior discrepância de volume. Quanto menor for o GSD, menor será a altura de voo e maior será a resolução da imagem (considerando a utilização do mesmo sensor).

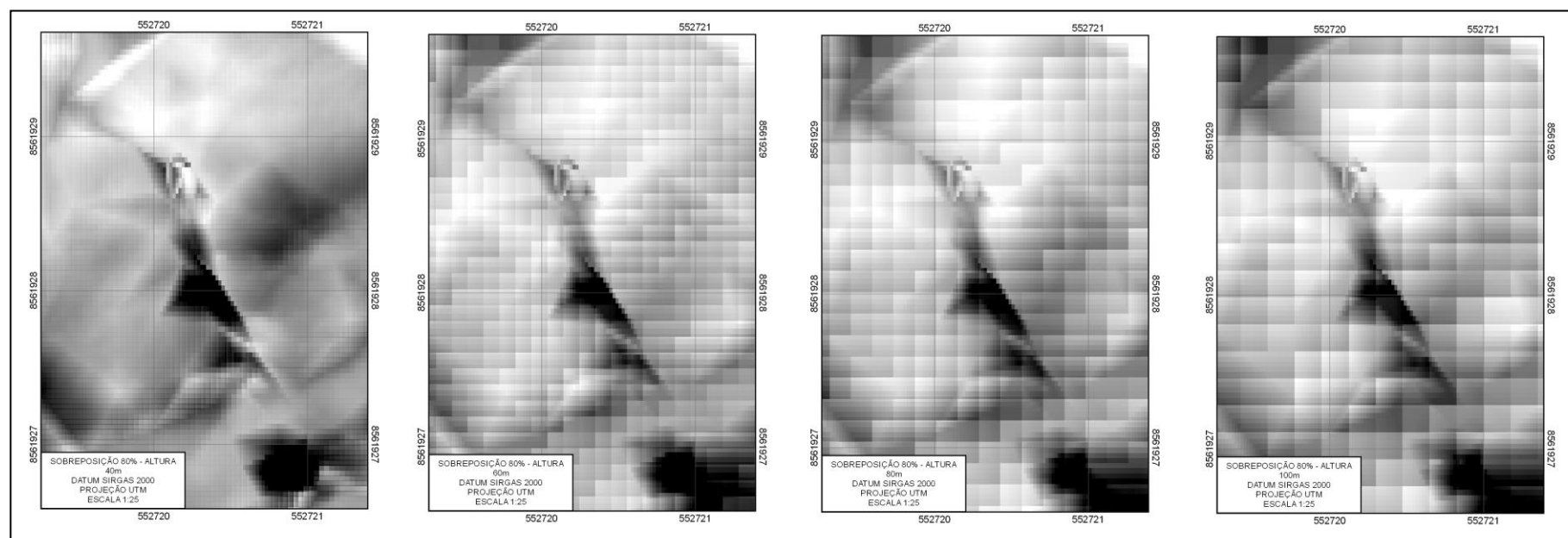


Figura 38 – Análise da diferença de intensidade de pixel –Blocos (MORRO 1)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os modelos apresentados a seguir na figura 39 referem-se à diferença de intensidade de pixel entre os rasters de declividade gerados pela estação total e o VANT nas três situações descritas anteriormente para a ravina localizada no MORRO 2. O ponto de coloração mais escura significa maior diferença de pixel e, também, regiões problemáticas no levantamento com VANT que ocasionou uma maior discrepância de volume. Quanto menor for o GSD, menor será a altura de voo e maior será a resolução da imagem (considerando a utilização do mesmo sensor).

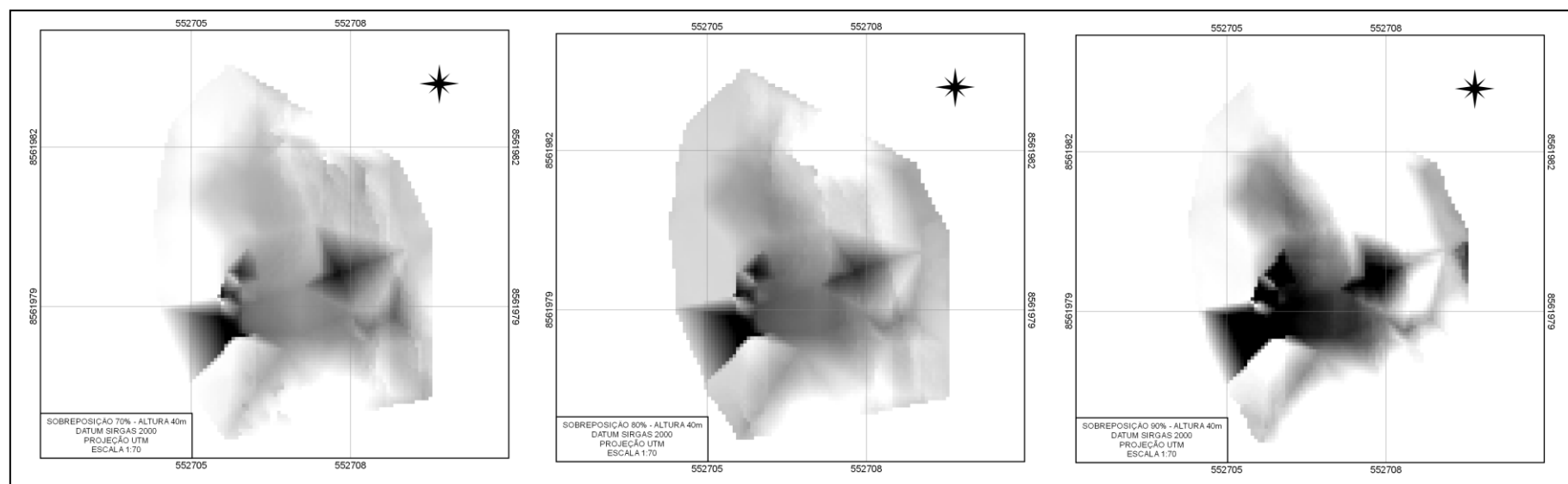


Figura39 – Análise da diferença de intensidade de pixel –Blocos (MORRO 2)

Fonte: Elaborado pelo autor

No quadro 11 foram calculados a média, variância e desvio padrão da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 2, MORRO 1 e no quadro 12 a do MORRO 2.

Quadro 11: Análise estatística da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 2, MORRO 1.

MORRO 1											
BLOCO 1 - 40m			BLOCO 2 - 60m			BLOCO 3 - 80m			BLOCO 4 - 100m		
MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR
0,04	0,23	0,05	0,17	0,29	0,09	0,06	0,29	0,08	0,09	0,3	0,09

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 12: Análise estatística da discrepância da altimetria dos pontos homólogos do VANT e Estação Total, da região de estudo 2, MORRO 2.

MORRO 2			MORRO 2			MORRO 2		
BLOCO 5 - SB70			BLOCO 6 - SB80			BLOCO 7 - SB90		
MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR	MÉDIA	DEV PAD	VAR
-0,75	1,08	1,17	-0,64	1,01	1,02	-0,72	1,04	1,08

Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados no levantamento com o VANT, a partir de análises na região de estudo 1, que sem utilização de pontos de apoio e sinalização de marcação no solo, o cálculo de volume utilizando a aerofotogrametria digital por VANT com câmera de pequeno formato, é um produto com baixa precisão e confiabilidade para dados de altimétrica, visto que suas comparações de discrepâncias com os dados levantados por estação total obteve um valor de 16,58%.

Os resultados revelam que no levantamento com o VANT na região de estudo 1, utilização de pontos de apoio e sinalização de marcações no solo, os valores de discrepâncias na comparação com uso de estação total foram minimizados, e os volumes com grade simples e dupla se aproximaram do valor de referência, 1,87% e 0,28% respectivamente. Logo, a utilização de marcações no solo, para auxiliar na correlação de imagens, foi uma técnica que favoreceu para melhores resultados nos testes propostos para avaliar o potencial do VANT.

Ainda na região de estudo 1, com utilização de pontos de apoio os valores de discrepâncias na comparação com uso de estação total e VANT não variaram de forma significativa com o aumento da altura de voo, como vistos na comparação de volume, discrepâncias de 0,04%, 0,20% e 0,21%, e na comparação de área de superfície 0,03%, 0,02% e 0,02%, respectivamente para as alturas 40m, 80m e 120m.

No levantamento com o VANT na região de estudo 2, MORRO 1, a mudança de altura de voo (40m, 60m 80m e 100m) não ocasionou em uma mudança proporcional na discrepância em relação a referência, isso porque a região de ravina favoreceu para diminuição da nuvem densa de pontos na área de interesse, resultando em respostas aleatórias do produto final do VANT. As discrepâncias foram altas para o cálculo do volume negativo, variando de 39,6% a 85,2%. Também se obteve valores de discrepâncias altas no comparativo de área de superfície, com valores que variaram de 60,3% a 95,6%. Não sendo assim recomendado o uso do VANT nas situações semelhantes aos testes aplicados;

No levantamento com o VANT na região de estudo 2, MORRO 2, onde existe uma ravina de maior abertura, e menor oclusão, a mudança de sobreposição (70%, 80% e 90%) não ocasionou em uma mudança sistemática na discrepância em relação a referência, pois como citado anteriormente, a região de ravina favoreceu para diminuição da nuvem densa de pontos na área de interesse, resultando em respostas aleatórias do produto final do VANT. As discrepâncias foram altas no cálculo do volume negativo, variando de 24,9% a 57,7%, não sendo assim recomendado o uso do VANT nas situações semelhantes aos testes aplicados.

O desvio padrão e variância do comparativo de dados de altimetria entre estação total e VANT foram baixos, significando que o uso do VANT como plataforma de obtenção de dados possui confiabilidade se utilizado em conformidade com boas práticas, e acarretaria em grande contribuição, visto que fornece bons resultados em regiões sem oclusão. As discrepâncias altas na análise dos

volumes negativos de ravinas têm como motivo a baixa densidade de pontos. Como foi possível observar na análise da diferença de intensidade de pixel dos rasters, as regiões mais problemáticas são aquelas de maior oclusão, e conseqüentemente, menor densidade de pontos.

De fato, a delimitação de processos erosivos através do uso do VANT tornaria mais rápido o processo de avaliação de ocorrência, principalmente quando da existência de cenários complexos. Recomenda-se a continuação de estudos associando a fotogrametria terrestre com a aerofotogrametria, para compensar a oclusão, aumentando a densidade de pontos em regiões problemáticas. A definição de técnicas de VANT e fotogrametria terrestre sólidas seria de grande contribuição científica e viabilizaria a aplicação em projetos diversos. A verificação da aplicabilidade do sensoriamento remoto por imagens a curta distâncias se tornaria viável economicamente, visto que os valores atuais para a compra e operação de serviços com VANTS para sensoriamento remoto demonstram viabilidade econômica para aplicação. O produto gerado pode gerar resultados que contribuam com redução de gastos.

REFERÊNCIAS

- ABIB, O. A. **Aerofotogrametria. Presidente Prudente: Instituto de Planejamento e Estudos Ambientais**, (IPEA) - Unesp, 1983. 217 p.
- ALIXANDRINI JUNIOR, M. J. ; SILVA, S. D. R. S. E. ; FERNANDES, V. de O ; CUNHA, A. A. . **Levantamento de patrimônio arquitetônico com RPA: estudo de caso do conjunto Santuário São Lazaro e São Roque e Casarão Lazareto**, Salvador/BA. In: 7º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável: Contrastes, Contradições e Complexidades. Desafios Urbanos no Século XXI, 2016, Maceió. Anais Pluris 2016. Maceió: Viva Editora, 2016. v. 7.
- ALMEIDA, I. C. **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Católica de Pernambuco, Recife. 2014.
- ALMEIDA, J. **Ortofoto Digital**. 1989. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- ANAC (Agência Nacional da Aviação Civil). **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017)**.
- Andrade, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba – PR. SBEE. 258p. 1998.
- ARRUDA JR, E.R.; HASEGAWA, J.K.; IMAI, N.N. **Atualização Cartográfica baseada em Imagens Digitais Retificadas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 4, 2000, Florianópolis. Anais eletrônicos... Florianópolis: UFRGS, CD-Rom.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995) ABNT NBR 6502:SOLO – **Rochas e Solos**. Rio de Janeiro/RJ.
- AUGUSTO, E. G. G. **Normalização de Estereogramas e sua Aplicação na Geração de Modelos Numéricos de Elevação**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Cartográfica – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- BERGSMAN, E., Charman, P., Gibbons, F., Hurni, H., Moldenhauer, W.C. e Panichapong, S. (1996). **Terminology for soil erosion and conservation**. International Society of Soil Science, Holanda, 313p.
- Bertoni, J. e Lombardi Neto, F. (1993). **Conservação do Solo**. 3ª edição, Ícone Editora, São Paulo.
- BERTONI, J. **Conservação do solo/Francisco Lombardi Neto**. São Paulo: Ícone, 2005. 5ª Edição.
- BERTONI, J. **O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão**. Bragantia, Campinas, SP, 18:113-140, 1959.
- Brasil. **Instrução do Comando da Aeronáutica**. ICA-10-40-DECEA. (Publicado no BCA nº 212, de 19 de novembro de 2015). Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA.
- BRITO, J. L. N. S.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. 196p. 1ª Ed. Rio de Janeiro, Ed UERJ, 2007.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2001. 345 p.

CANIL, K. et al. **Mapa de feições erosivas lineares do Estado de São Paulo**, uma análise qualitativa e quantitativa. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO. 5., Bauru. Anais do... Bauru: ABGE/PMB/UNESP, 1995. p. 249-251.

CASSEMIRO, G. H. M.; PINTO, H. B. **Composição e processamento de imagens aéreas de alta-resolução obtidas com Drone**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Brasília. 2014.

CHEN, S. H.; SU, H. B.; XIA, R. H. Z. **Estimating soil erosion using MODIS and TM images based on support vector machine and à trous wavelet**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13 (2011) 626–635.

De Rose R C, Gomez B, Marden M, Trustrum N A (1998) **Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models**. Earth Surface Processes and Landforms, 23: 1045-1053.

Digital Globe. **Advanced Elevation Series (AES) Information Products**. Disponível em: <http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Advanced%20Elevation%20Series%20Datasheet.pdf>. Acesso em: 24 .JUL. 2017.

DOYLE, F.J. **Digital terrain models: an overview**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.44, n.12, p.1481-1485, 1978.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 412 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**. 3 ed. Revisada, Brasília: EMBRAPA, 2013.

FAO. 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. Rome: FAO, 191p. (World Soil Resources Reports 106)

FOSTER, R.C. **Microenvironments of soil microorganisms**. Biol. Fertil. Soils, 1988.

FREIRE, O. (1992). **Avaliação do método nomográfico para determinação da erodibilidade de latossolos do Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas. v. 7, p. 191-195.

GALVÃO, G. M; ROSALEN, D. L. **Acurácia da mosaicagem gerada por veículo aéreo não tripulado utilizado na agricultura de precisão**. In: FURLANI, C.E.A; SILVA, R.P; ROSALEN, D.L. (Org.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (42. 2013, Fortaleza): Os desafios para o desenvolvimento sustentável. 1ed. Jaboticabal: SBEA, 2013, v. , p. 3-.

GAWSKI, M; COLETTA, P. C. D; ANDRADE, A. G; TANAKA, E. M. **Validação de levantamento planialtimétrico realizado pelo veículo aéreo não tripulado SenseFly na cultura de cana-de-açúcar**. In: ENCONTRO DE MECANIZAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2013, POMPEIA-SP. 3 EnqMap. Pompeia-SP: EnqMap, 2013. p.18-18.

GAO, J.; LIU, Y. **Determination of land degradation causes in Tongyu County, Northeast China via land cover change detection**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 12 (2010) 9–16.

GEMAEL, Camil. **Geodesia Celeste**. Editora UFPR, 2004.

GENCHI, S. A. Et al. **Structure-from-Motion Approach for Characterization of Bioerosion Patterns Using UAV Imagery**. *Sensors* 2015, 15, 3593-3609.

GESSESSE, G. D. et al. **Assessment of erosion, Deposition and Rill Development on Irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry**. *The Photogrammetric Record* 25(131): 299–318 (September 2010).

Grissinger, E. (1996) **Rill and gullies erosion**. In Agassi M (ed.) *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. CRC Press: 153-168.

Guerra, A. J. T. (2002). **Processos erosivos nas encostas**. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.139-155.

GUERRA, A.J.T. (1995). **Processos erosivos nas encostas**. In: *Geomorfologia – uma Atualização de Bases e Conceitos*. Editores: A.J.T.Guerra e S.B.Cunha, Ed. BertrandBrasil, Rio de Janeiro, 2ª edição, 149-209.

Guerra, A. J. T. (2005). **Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos**. *Revista do Departamento de Geografia*. Universidade de São Paulo, n.16, p.32-37, 2005.

GUERRA, A.J. T. E BOTELHO, R. G.M. (1996). **Características e propriedades dos solos releVANTes para os estudos pedológicos**. *Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ*, 19,93-114.

GUERRA, A.J.T. E BOTELHO, R.G.M. (no prelo). **Erosão dos Solos**. 111: *Geomorfologia do Brasil*. Editores: S.B.Cunha e A.J.T.Guerra, Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.

GUERRA, A.J.; GUERRA, A.J.T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 9ª edição – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011, 648 p.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 10ª edição – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011, 474 p.

HENG, B.C.P., CHANDLER, J.H. and ARMSTRONG, A., 2010. **Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies**. *The Photogrammetric Record*, 25 (131), pp. 240-265.

HAMADA, Y.; GRIPPO, M. A. **Erosion Resistance Index (ERI) to Assess Surface Stability in Desert Environments**. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 11, nov. 2015, p. 2193-2197.

HAMISAI, H.; ECKARDT, F.; CHANDA, R. **Linking archival and remotely sensed data for long-term environmental monitoring**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7 (2005) 284–298.

HORTON, R.E. **Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology**. *Geol Soe. Am. Bull.*, v.56, n.3, p.275-370, 1945.

HUDSON, N. **A field technique to directly measure river bank erosion**. *Canadian Journal Earth Science*, v.19, 1981. p. 381-383.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Especificações e Normas Gerais para levantamentos GPS, Rio de Janeiro, 2008. IBGE. **Sistema Geodésico de Referência**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm>>. Acesso em: 01 de junho, 2017.

IDOETA, I. V. **Metodologia de elaboração automatizada de modelo digital de elevação e ortofoto em média e pequena escala**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

INCRA, INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Manual Técnico de Posicionamento**. Brasília, 2013. 1ª Edição.

IPT (1986), Departamento de águas e Energia Elétrica. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Orientações para o combate á erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe – Paranapapema**. Vol.6. (IPT, Relatório, 24.739), (C.P; ME), São Paulo, SP.

JACOBSEN, K. **Comparison of information contents of different space images**. In: JOINT WORKSHOP SENSORS AND MAPPING FROM SPACE, 1997. University of Hannover, 1997. Proceedings. Hannover, 1997. Disponível em: < <http://www.ipi.uni-hannover.de/index1.htm> > Acesso em: 18 jul. 2018.

JORGE, F.N. & UEHARA, K. **Águas de Superfície**. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 7, p.101-109.

JORGE, L. A. C.; INAMASU, Y.; CARMO, B. **Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações em Agricultura de Precisão no Brasil**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, Curitiba, PR, 399 – 406, 2011.

JUNIOR, Mauro José Alixandrini et al. **Levantamento de Patrimônio Arquitetônico com RPA: Estudo de caso do Conjunto Santuario São Lazaro e São Roque e Casarão Lazareto, Salvador/Ba**. Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, PLURIS. Maceió: 2016.

KARIMI, N.; MORRIDNEJAD, A. **Evidence for Mountain Glacier Changes in Semi-arid Environments based on Remote Sensing Data**. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, dez. 2014, volume 42, Issue 4, pp 801–815.

LEINZ, V. & AMARAL, S.E. **Geologia Geral**. 11ª ed. São Paulo: Editora Nacional, 1989. 399p.

LIM, M. and Petley, D. N. and Rosser, N. J. and Allison, R. J. and Long, A. J. and Pybus, D. (2005). **Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cli_ evolution**. Photogrammetric record., 20 (110). pp. 109-129.

LIMA, G.L. **CARACTERIZAÇÃO DE VERTISSOLOS DO NORDESTE BRASILEIRO**. 101p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

LIMA, M.P.L., BAHIA, V., CURI,N. SILVA, M.L.N. **Princípios de erodibilidade do solo**. Informe Agropecuário, v. 16, n.176,p.38-43.

LIMA, V.C.;LIMA, M.R. **O solo no meio ambiente: Abordagem para professores do ensino**. 1 ed. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2007.

LIMA, V. R. P. et al. **Estabilização de voçoroca: subproduto ambiental do diagnóstico dos recursos hídricos, o caso do assentamento Dona Antônia Conde - PB**. In: Seminário Luso Brasileiro Caboverdiano, III Encontro Paraibano de Geografia, III Semana de Geografia da UFPB. João Pessoa, 1992.

LOCZY, L. & LADEIRA, E.A. **Geologia estrutural e introdução à geotectônica**. Rio de Janeiro/São Paulo: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Cnpq) & Editora Edgard Blücher Ltda, 1981. 528p.

LOWE, DAVID G. **Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints**. Computer Science Department, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada, 2004.

LUGNANI, J. B. **Introdução a fototriangulação**. Editora UFPR, Curitiba, 1989. 134 p.

MARTHA, T. R. et al. **Landslide Volumetric Analysis Using Cartosat-1-Derived DEMs**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 7, no. 3, jul 2010. p. 582-586.

MENDONÇA JUNIOR, M. G., SALDANHA, M. F. S. SARTORI, A. V. **Uso de sistemas fotogramétricos digitais no mapeamento sistemático** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 20, Porto Alegre, 2001. Anais. Porto Alegre: 2001. 1 CD-ROM.

Mikhail, E. M. ; Bethel, J. S. ; McGlone, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Edit. John Wiley & Sons Inc. 2001

MIKHAIL, E.M.; HELAVA, U.V.; JANCAITIS, J.R.; DOYLE, F.J.; HELMERING, R.J.; ACKERMANN, F.; TURNER, A.K. Panel discussion: **the future of DMT. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.44, n.12, p.1487-1497, 1978.

MIKOS, M. **Landslides: A state-of-the art on the current position in the landslide research community**. Landslides (2011) 8:541–551.

MILLER, L.D.; NUALCHAWEE, K.; TOM, C. **Analysis of dynamics of shifting cultivation in the tropical forests of northern Thailand using landscape modeling and classification of Landsat imagery**. Maryland: NASA, 1978. 19p.(Technical Memorandum, 79545).

MOLLER, M.; LYMBURNER, L.; VOLK, M. **The comparison index: A tool for assessing the accuracy of image segmentation**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 9 (2007) 311–321.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Unesp, 2000a. p 287.

MORGAN, R.P.C. (1986), **Soil erosion and conservation**. Longman Group.

MORGADO, A. M. **Fotogrametria digital – automatização da orientação de imagens digitais**. Publicação do Instituto Português de Cartografia e Cadastro. Lisboa, n. 6, p. 03-11, jun, 1997

MUNDOGEO: **Revista Online**. Disponível em: www.mundogeo.com/blog/2003/10/15/ibge-tem-nova-ferramenta-paramapeamento-topografico-2/. Acessado em 20 de julho de 2018.

OLIVEIRA, M.A.T. **Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas**. In: Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Guerra, A.J.T.; Botelho, R.G.M. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

PANAGOS, P. et al. **Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 27 (2014) 147–155.

PAOLI, B. L.; TRINDADE, C, A.. **Boas práticas do uso da técnica de Structure from Motion**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

PCI GEOMATICS, OrthoEngine User guide version 9.0. Canadá, 2003.

PEREIRA, W. S.; MAGALHÃES, J. R. G.; CARDOSO, A. L. **Obtenção de Modelo Digital de Terreno e Ortomosaico na Região Subbacia Riacho do Machado, Cruz das Alma/Ba: Percepções a Partir do Processamento de Dados de Veículos Aéreos Não Tripulados**. Anais do GEONORDESTE 2017. Salvador, 2017

Petrobrás. **Mapeamento Geoambiental dos Campos de Produção Ativo Sul, Bacia do Recôncavo**. Editora: E&P, Salvador. V.1. Junho, 2009

PETROPOULOS, G. P. et al. **Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 35 (2015) 217–228.

Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C (2003) **Gully erosion and environmental change: importance and research needs**. Catena, 50: 91-133.

Poesen J, Vanwalleghe T, de Vente J, Knapen A, Verstraeten G, Martínez-Casasnovas J (2006) **Gully erosion in Europe**. In Boardman J, Poesen J (eds.) Soil Erosion in Europe. John Wiley and Sons: 515-536.

PRADA-GAMERO, R.R. et al. **Mineralogia e físico-química dos solos de mangue do rio Iriri no canal de bertiooga (santos, sp)**. R. Bras. Ci. Solo, v 28. p 233-243, 2004.

QUEIROZ FILHO, A. P. **Ortofoto digital para atualização cartográfica em um sistema de informações geográficas**. 1993. 132 p. Dissertação Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROSSA, J., ROQUE, C. C., CRUZ, B. **Ortofotocartas – da produção de imagens cartográficas à sua impressão e utilização nos sistemas de informação geográfica**. Disponível em: <<http://snig.igeo.pt/Portugues/Forum/Revista/n3/html/ortofotocartas3.htm>> Acesso em: 10 jul. 2018.

SANTANA, K. D. A. ; Nummer, A. V . **Estudos sobre processos erosivos na Geografia brasileira: período: 2004 - 2010**. In: Lauro César Figueiredo e Adriano Severo Figueiró. (Org.). Reflexões sobre a Geografia do Rio Grande do Sul: Temas em Debate. 1ed.Santa Maria/RS: UFSM, 2011, v. 1, p. 199-207.

SANTOS, A.G.; Segantine, P.C.L. **Avaliação da Qualidade das Coordenadas geográficas de Mapas digitais**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – UFSC Florianópolis, 15 a 19 de outubro 2006.

SILVA, A. M. **Curso de Processamento Digital de Imagens**. Apostila. Porto Alegre: XX Congresso Brasileiro de Cartografia, 2000a.

SILVA, M. S. **Sistemas de Informações Geográficas: elementos para o desenvolvimento de bibliotecas digitais geográficas distribuídas**. 167p. Dissertação de Mestrado (Programa de PósGraduação em Ciência da Informação - Universidade Estadual Paulista, Marília, 2006.

- SILVA, R. R. da. **APLICAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL NO CADASTRO TÉCNICO RURAL MULTIFINALITÁRIO**. 139p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007b.
- SILVEIRA, F. J. C. Fototriangulação pelo Método dos Feixes Perspectivos. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005, Macaé. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005. SIMMONS, G. **Orthophoto data: what is it?** *GeoEurope Magazine*, Godmanchester, UK. n. 6, p. 38-40, Jun. 2000.
- STAREK, M. J.; MITASOVA, H.; WEGMANN, K. W.; LYONS, N. **Space-Time Cube Representation of Stream Bank Evolution Mapped by Terrestrial Laser Scanning**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 10, no. 6, november 2013. p. 1369-1373.
- SCHENK, T. Automatic Generation of DEM's. In: **Manual of Photogrammetry Addendum**. USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996.
- Suertegaray, D. M. A. (org.) (2004) **Terra: feições ilustradas**. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- SZELISKI, R. Computer vision: **Algorithms and applications**. London: Springer, 2010, 979p.
- THOMA, D. P. et al. **Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment**. Remote Sensing of Environment 95 (2005) 493–501.
- ULLMAN, Richard H. **Redefining Security**. In: International Security, n.8, v.1, p. 129-153, 1983.
- VIDAL, A. M. F. **Extração e avaliação de geo-informação pelo uso de imagens adquiridas por veículos aéreos não tripulados**. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal. 2012.
- VIEIRA, A.F.G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. Tese (Doutorado). Florianópolis: DPGG, UFSC, 2008, 223 p.
- VRIELING, A. et al. **Timing of erosion and satellite data: A multi-resolution approach to soil erosion risk mapping**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 10 (2008) 267–281.
- WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSERN.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M. 2012. **'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications** *Geomorphology*, 179: 300-314.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C. B. e Cross, B.V. (1971). A **soil erodibility nomograph for farmland and construction sites**. Jour. Soil Wat. Conserv., v.26, 189-193.
- YUKSEL, A. et al. **Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaras, Turkey**. *Sensors* 2008, 8, 4851-4865.
- ZAPP, D. H. R.; NEARING, M. A. **Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion**. The Photogrammetric Record 20(109): 69–87 (Mar. 2005).

APÊNDICES

Apêndice A - Parâmetros de processamento, região 1 (VOO 40m)

Geral

Câmaras	61
Alignedcameras	61
Coordinatesystem	WGS 84(EPSON::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	8,777 of 362,994
RMSreprojectionerror	0.318596 (1.2428pix)
Maxreprojectionerror	1.14434 (17.7126pix)
Mean keypointsize	4.02819pix
Sobreposiçãoefetiva	4.05631

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Elevada
Pré-seleçãode pares	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000
Restringir características considerando máscaras	Não
Adaptive cameramodel fitting	Sim
Matchingtime	9 minutes 50seconds
Alignmenttime	3 minutes 19seconds

Mapas de Profundidade

Número	61
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempode processamento	5 minutes 36seconds

Dense Point Cloud

Pontos	108,181
--------	---------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	5minutes 36seconds
Dense cloudgenerationtime	55seconds

Modelo

Faces	12,764
Vértices	6,615
Texture	4,096 x 4,096, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas / Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive

Númerodefases 1,063,676
Tempodeprocessamento 11seconds

Parâmetros de texturização

Modo demapeamento Ortofoto
Modo decombinação Mosaico
Texture size 4,096x4,096
Enablecolorcorrection Sim
Enableholefilling Sim
UVmappingtime 6seconds
Blendingtime 2 minutes 32seconds

Tiled Model

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata Densecloud
Tilesize 256
Tempodeprocessamento 7 minutes 31seconds

DEM

Tamanho 3,615x3,771
Coordinatesystem SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSCG::31984)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata Densecloud
Interpolation Enabled
Tempodeprocessamento 13seconds

Orthomosaic

Tamanho 11,284x12,333
Coordinatesystem SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSCG::31984)
Channels 3,uint8
Modo decombinação Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface Mesh
Enablecolorcorrection Não
Tempodeprocessamento 1 minutes 26seconds

Software

Version 1.2.6 build2834
Platform Windows 64bit

Apêndice B - Parâmetros de processamento, região 1 (VOO 80m)

Geral

Câmaras	64
Alignedcameras	64
Coordinatesystem	WGS 84(EPG::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	956 of 100,301
RMSreprojectionerror	0.215771 (2.99509pix)
Maxreprojectionerror	0.710365 (42.5883pix)
Mean keypointsize	10.5739pix
Sobreposiçãoefetiva	4.42664

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Média
Pré-seleçãode pares	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000

Restringir características considerandoasmáscaras

No

Adaptive cameramodelfitting

Si

m

Matchingtime	2 minutes 55seconds
Alignmenttime	43seconds

Mapas de Profundidade

Número	64
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	14 minutes 46seconds

Dense Point Cloud

Pontos	26,372
--------	--------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	14 minutes 46seconds
Dense cloudgenerationtime	2 minutes 39seconds

Modelo

Faces	369
Vértices	214
Texture	4,096 x 4,096, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas /Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	302,152
Tempodeprocessamento	6seconds

Parâmetros de texturização

Modo demapeamento	Ortofoto
Modo de combinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096
Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim

UVmappingtime	0seconds
Blendingtime	2 minutes 58seconds
Tiled Model	
Parâmetros de reconstrução	
Sourcedata	Densecloud
Tilesize	256
Tempodeprocessamento	6 minutes 15seconds
DEM	
Tamanho	2,893x2,998
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSTG:::31984)
Parâmetros de reconstrução	
Sourcedata	Densecloud
Interpolation	Enabled
Tempodeprocessamento	10seconds
Orthomosaic	
Tamanho	9,587x9,767
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSTG:::31984)
Channels	3,uint8
Modo de combinação	Mosaico
Parâmetros de reconstrução	
Surface	DEM
Enablecolorcorrection	Não
Tempodeprocessamento	1 minutes 24seconds
Software	
Version	1.2.6 build2834
Platform	Windows 64bit

Apêndice C - Parâmetros de processamento, região 1 (VOO 120m)

Geral

Câmaras	32
Alignedcameras	32
Coordinatesystem	WGS 84(EPSTG::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	570 of 52,603
RMSreprojectionerror	0.183821 (2.03746pix)
Maxreprojectionerror	0.516562 (19.6098pix)
Mean keypointsize	9.37007pix
Sobreposiçãoefetiva	3.71943

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Média
Pré-seleção de pares	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000
Restringir características considerando as máscaras	Não

Adaptive cameramodelfitting	Sim
Matchingtime	57seconds
Alignmenttime	20seconds

Mapas de Profundidade

Número	32
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	6 minutes 52seconds

Dense Point Cloud

Pontos	1,242
--------	-------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	6minutes 52seconds
Dense cloudgenerationtime	42seconds

Modelo

Faces	153
Vértices	93
Texture	4,096 x 4,096, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas / Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	202,020
Tempodeprocessamento	4seconds

Parâmetros de texturização

Modo de mapeamento	Ortofoto
Modo de combinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096
Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim
UVmappingtime	1seconds
Blendingtime	1 minutes 1 seconds

Tiled Model**Parâmetros de reconstrução**

Sourcedata

Densecloud

Tilesize

256

Tempodeprocessamento

4 minutes 2seconds

DEM

Tamanho

2,080x2,394

Coordinatesystem

SIRGAS2000/UTMzone24S(EPWG::31984)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata

Densecloud

Interpolation

Enabled

Tempodeprocessamento

6seconds

Orthomosaic

Tamanho

6,984 x8,11

Coordinatesystem

SIRGAS2000/UTMzone24S(EPWG::31984)

Channels

3,uint8

Modo de combinação

Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface

DEM

Enablecolorcorrection

Não

Tempodeprocessamento

40seconds

Software

Version

1.2.6 build2834

Platform

Windows 64bit

Apêndice D - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 1 - VOO 40m)

Geral

Câmaras	38
Alignedcameras	38
Marcadores	3
Coordinatesystem	WGS 84(EPSTG::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	332 of 245,13
RMSreprojectionerror	0.248573 (1.22052pix)
Maxreprojectionerror	0.808217 (10.4122pix)
Mean keypointsize	4.08022pix
Sobreposiçãoefetiva	3.82537

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Elevada
Pré-seleçãode pares	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000
Restringir características considerandoasmáscaras	Não
Adaptive cameramodelfitting	Sim
Matchingtime	5 minutes 14seconds
Alignmenttime	55seconds

Mapas de Profundidade

Número	38
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Elevada
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	12 minutes 16seconds

Dense Point Cloud

Pontos	35,720
--------	--------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Elevada
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	12 minutes 16seconds
Dense cloudgenerationtime	1 minutes 25seconds

Modelo

Faces	1,872
Vértices	1,025
Texture	4,096 x4,096,uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas /Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Elevada
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	3,298,852
Tempodeprocessamento	47seconds

Parâmetros de texturização

Modo demapeamento	Ortofoto
Modo decombinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096
Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim
UVmappingtime	26seconds
Blendingtime	1 minutes 46seconds

Tiled Model**Parâmetros de reconstrução**

Sourcedata

Densecloud

DEM

Tamanho

6,895x7,012

Coordinatesystem

WGS 84(EPSCG::4326)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata

Densecloud

Interpolation

Enabled

Tempodeprocessamento

18seconds

Orthomosaic

Tamanho

9,403x9,464

Coordinatesystem

WGS 84(EPSCG::4326)

Channels

3,uint8

Modo de combinação

Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface

Mesh

Enablecolorcorrection

Sim

Tempodeprocessamento

2 minutes 12seconds

Software

Version

1.2.6 build2834

Platform

Windows 64bit

Tile size 256

Tempodeprocessamento

18 minutes 34seconds

Apêndice E - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 1 - VOO 60m)

Geral

Câmaras		34	
Alignedcameras		34	
Marcadores		3	
Coordinatesystem		WGS 84(EPSTG::4326)	
Nuvem de Pontos			
Pontos		6,002 of 219,890	
RMSreprojectionerror		0.270462 (1.66408pix)	
Maxreprojectionerror		1.06892 (66.677pix)	
Mean keypointsize		4.42994pix	
Sobreposiçãoefetiva		4.01222	
Parâmetros de alinhamento			
Precisão		Elevada	
Pré-seleçãode pares		Reference	
Keypointlimit		2,000,000	
Tiepointlimit		100,000	
Restringir	características		
considerandoasmáscaras		Não Adaptive cameramodelfitting	Sim
Matchingtime		5 minutes 48seconds	
Alignmenttime		1 minutes 32seconds	
Mapas de Profundidade			
Número		34	
Parâmetros de reconstrução			
Qualidade		Média	
Filteringmode		Aggressive	
Tempodeprocessamento		2 minutes 48seconds	
Dense Point Cloud			
Pontos		65,212	
Parâmetros de reconstrução			
Qualidade		Média	
Depthfiltering		Aggressive	
Depth mapsgenerationtime		2 minutes 48seconds	
Dense cloudsgenerationtime		22seconds	
Modelo			
Faces		2,654	
Vértices		1,405	
Texture		4,096 x 4,096, uint8	
Parâmetros de reconstrução			
Surfacetype		Mapa de alturas / Terreno	
Sourcedata		Dense	
Interpolation		Enabled	
Qualidade		Média	
Depthfiltering		Aggressive	
Númerodefases		670,389	
Tempodeprocessamento		6seconds	
Parâmetros de texturização			
Modo demapeamento		Ortofoto	
Modo de combinação		Mosaico	
Texture size		4,096x4,096	
Enablecolorcorrection		Sim	
Enableholefilling		Sim	
UVmappingtime		2seconds	

Blendingtime 1 minutes 17seconds

Tiled Model

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata Densecloud

Tilesize 256
Tempodeprocessamento 4 minutes 12seconds

DEM

Tamanho 2,255x2,546
Coordinatesystem SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSCG::31984)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata Densecloud
Interpolation Enabled
Tempodeprocessamento 7seconds

Orthomosaic

Tamanho 7,952x8,134
Coordinatesystem SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSCG::31984)
Channels 3,uint8
Modo de combinação Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface Mesh
Enablecolorcorrection Não
Tempodeprocessamento 37seconds

Software

Version 1.2.6 build2834
Platform Windows 64bit

Apêndice F - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 1 - VOO 80m)

Geral

Câmaras	43
Alignedcameras	43
Marcadores	3
Coordinatesystem	WGS 84(EPWG::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	6,565 of289,471
RMSreprojectionerror	0.291398 (1.21949pix)
Maxreprojectionerror	0.885354 (28.1492pix)
Mean keypointsize	4.22819pix
Sobreposiçãoefetiva	4.37243

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Elevada
Pré-seleçãodepareas	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000
Restringir características considerandoasmáscaras	No Adaptive cameramodelfitting Sm
Matchingtime	8 minutes 15seconds
Alignmenttime	1 minutes 57seconds

Mapas de Profundidade

Número	43
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	4 minutes 51seconds

Dense Point Cloud

Pontos	24,251
--------	--------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	4minutes 51seconds
Dense cloudgenerationtime	35seconds

Modelo

Faces	1,623
Vértices	878
Texture	4,096 x4,096,uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas /Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	748,284
Tempodeprocessamento	8seconds

Parâmetros de texturização

Modo demapeamento	Ortofoto
Modo decombinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096
Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim
UVmappingtime	3seconds
Blendingtime	

Tiled Model**Parâmetros de reconstrução**

Sourcedata	Densecloud
Tilesize	256
Tempodeprocessamento	4 minutes 48seconds

DEM

Tamanho	2,564x2,773
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSTG::31984)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata	Densecloud
Interpolation	Enabled
Tempodeprocessamento	8seconds

Orthomosaic

Tamanho	7,805x9,520
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSTG::31984)
Channels	3,uint8
Modo de combinação	Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface	Mesh
Enablecolorcorrection	Não
Tempodeprocessamento	48seconds

Software

Version	1.2.6 build2834
Platform	Windows 64bit

Apêndice G - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 1 - VOO 100m)

Geral

Câmaras	37
Alignedcameras	37
Marcadores	3
Coordinatesystem	WGS 84(EPG::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	3,903 of250,866
RMSreprojectionerror	0.248401 (1.06132pix)
Maxreprojectionerror	0.773122 (30.2314pix)
Mean keypointsize	4.12227pix
Sobreposiçãoefetiva	4.03483

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Elevada
Pré-seleçãodepareas	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000
Restringir características considerandoasmáscaras	Não Adaptive cameramodelfitting Sim
Matchingtime	6 minutes 0seconds
Alignmenttime	1 minutes 24seconds

Mapas de Profundidade

Número	37
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	4 minutes 0seconds

Dense Point Cloud

Pontos	20,664
--------	--------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	4minutes 0seconds
Dense cloudgenerationtime	29seconds

Modelo

Faces	1,380
Vértices	741
Texture	4,096 x4,096,uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas /Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	666,465
Tempodeprocessamento	6seconds

Parâmetros de texturização

Modo demapeamento	Ortofoto
Modo decombinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096
Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim
UVmappingtime	2seconds
Blendingtime	1 minutes 30seconds

Tiled Model**Parâmetros de reconstrução**

Sourcedata	Densecloud
Tilesize	256
Tempodeprocessamento	4 minutes 43seconds

DEM

Tamanho	2,172x2,647
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSON::31984)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata	Densecloud
Interpolation	Enabled
Tempodeprocessamento	7seconds

Orthomosaic

Tamanho	7,395x8,135
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSON::31984)
Channels	3,uint8
Modo de combinação	Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface	Mesh
Enablecolorcorrection	Não
Tempodeprocessamento	38seconds

Software

Version	1.2.6 build2834
Platform	Windows 64bit

Apêndice H - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 2 - VOO SB70)

Geral

Câmaras	38
Alignedcameras	38
Coordinatesystem	WGS 84(EPSTG::4326)
Nuvem de Pontos	
Pontos	6,918 of 239,384
RMSreprojectionerror	0.373228 (1.49754pix)
Maxreprojectionerror	1.19986 (18.2356pix)
Mean keypointsize	4.41486pix
Sobreposiçãoefetiva	3.333
Parâmetros de alinhamento	
Precisão	Elevada
Pré-seleçãode pares	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000
Restringir características considerandoasmáscaras	Nã
o Adaptive cameramodelfitting	Si
m	
Matchingtime	3 minutes 52seconds
Alignmenttime	1 minutes 44seconds
Mapas de Profundidade	
Número	38
Parâmetros de reconstrução	
Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	1 minutes 39seconds
Dense Point Cloud	
Pontos	61,695
Parâmetros de reconstrução	
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	1 minutes 39seconds
Dense cloudsgenerationtime	18seconds
Modelo	
Faces	10,996
Vértices	5,661
Texture	4,096 x 4,096, uint8
Parâmetros de reconstrução	
Surfacetype	Mapa de alturas / Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	927,900
Tempodeprocessamento	1 seconds
Parâmetros de texturização	
Modo demapeamento	Ortofoto
Modo de combinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096

Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim
UVmappingtime	8seconds
Blendingtime	1 minutes 33seconds
Tiled Model	
Parâmetros de reconstrução	
Sourcedata	Densecloud
Tilesize	256
Tempodeprocessamento	5 minutes 55seconds
DEM	
Tamanho	3,689x3,591
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSTG:::31984)
Parâmetros de reconstrução	
Sourcedata	Densecloud
Interpolation	Enabled
Tempodeprocessamento	12seconds
Orthomosaic	
Tamanho	9,509x12,149
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSTG:::31984)
Channels	3,uint8
Modo de combinação	Mosaico
Parâmetros de reconstrução	
Surface	Mesh
Enablecolorcorrection	Não
Tempodeprocessamento	51seconds
Software	
Version	1.2.6 build2834
Platform	Windows 64bit

Apêndice I - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 2 - VOO SB80)

Geral

Câmaras	39
Alignedcameras	39
Coordinatesystem	WGS 84(EPWG::4326)

Nuvem de Pontos

Pontos	9,464 of 233,674
RMSreprojectionerror	0.290834 (1.19321pix)
Maxreprojectionerror	0.820859 (34.8438pix)
Mean keypointsize	4.42633pix
Sobreposiçãoefetiva	3.60999

Parâmetros de alinhamento

Precisão	Elevada
Pré-seleçãode pares	Reference
Keypointlimit	2,000,000
Tiepointlimit	100,000

Restringir características considerandoasmáscaras

Nã

o Adaptive cameramodelfitting

Si

m

Matchingtime	4 minutes 55seconds
Alignmenttime	1 minutes 16seconds

Mapas de Profundidade

Número	39
--------	----

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Filteringmode	Aggressive
Tempodeprocessamento	2 minutes 22seconds

Dense Point Cloud

Pontos	65,605
--------	--------

Parâmetros de reconstrução

Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Depth mapsgenerationtime	2minutes 22seconds
Dense cloudgenerationtime	21seconds

Modelo

Faces	9,145
Vértices	4,714
Texture	4,096 x4,096, uint8

Parâmetros de reconstrução

Surfacetype	Mapa de alturas /Terreno
Sourcedata	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Média
Depthfiltering	Aggressive
Númerodefases	798,462
Tempodeprocessamento	8seconds

Parâmetros de texturização

Modo demapeamento	Ortofoto
Modo decombinação	Mosaico
Texture size	4,096x4,096
Enablecolorcorrection	Sim
Enableholefilling	Sim

UVmappingtime	3seconds
Blendingtime	1 minutes 23seconds
Tiled Model	
Parâmetros de reconstrução	
Sourcedata	Densecloud
Tilesize	256
Tempodeprocessamento	4 minutes 54seconds
DEM	
Tamanho	3,362x3,307
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSON::31984)
Parâmetros de reconstrução	
Sourcedata	Densecloud
Interpolation	Enabled
Tempodeprocessamento	11seconds
Orthomosaic	
Tamanho	9,107x10,082
Coordinatesystem	SIRGAS2000/UTMzone24S(EPSON::31984)
Channels	3,uint8
Modo de combinação	Mosaico
Parâmetros de reconstrução	
Surface	Mesh
Enablecolorcorrection	Não
Tempodeprocessamento	57seconds
Software	
Version	1.2.6 build2834
Platform	Windows 64bit

Apêndice J - Parâmetros de processamento, região 2 (MORRO 2 - VOO SB90)

Geral		
Câmaras	81	
Alignedcameras	81	
Coordinatesystem	WGS 84(EPSTG::4326)	
Nuvem de Pontos		
Pontos	14,964 of432,216	
RMSreprojectionerror	0.234285 (1.08555pix)	
Maxreprojectionerror	0.691412 (44.65pix)	
Mean keypointsize	4.41202pix	
Sobreposiçãoefetiva	4.74717	
Parâmetros de alinhamento		
Precisão	Elevada	
Pré-seleçãoodepares	Reference	
Keypointlimit	2,000,000	
Tiepointlimit	100,000	
Restringir características considerandoasmáscaras	Não Adaptive cameramodelfitting	Sim
Matchingtime	20 minutes 45seconds	
Alignmenttime	2 minutes 48seconds	
Mapas de Profundidade		
Número	81	
Parâmetros de reconstrução		
Qualidade	Média	
Filteringmode	Aggressive	
Tempodeprocessamento	13 minutes 50seconds	
Dense Point Cloud		
Pontos	81,945	
Parâmetros de reconstrução		
Qualidade	Média	
Depthfiltering	Aggressive	
Depth mapsgenerationtime	13 minutes 50seconds	
Dense cloudsgenerationtime	1 minutes 29seconds	
Modelo		
Faces	1,596	
Vértices	6,096	
Texture	4,096 x4,096,uint8	
Parâmetros de reconstrução		
Surfacetype	Mapa de alturas /Terreno	
Sourcedata	Dense	
Interpolation	Enabled	
Qualidade	Média	
Depthfiltering	Aggressive	
Númerodefases	1,029,957	
Tempodeprocessamento	10seconds	
Parâmetros de texturização		
Modo demapeamento	Ortofoto	
Modo decombinação	Mosaico	
Texture size	4,096x4,096	
Enablecolorcorrection	Sim	
Enableholefilling	Sim	
UVmappingtime	5seconds	
Blendingtime	3 minutes 40seconds	

Tiled Model**Parâmetros de reconstrução**

Sourcedata

Densecloud

Tilesize

256

Tempodeprocessamento

6 minutes 40seconds

DEM

Tamanho

3,399x3,392

Coordinatesystem

SIRGAS2000/UTMzone24S(EP

SG::31984)

Parâmetros de reconstrução

Sourcedata

Densecloud

Interpolation

Enabled

Tempodeprocessamento

12seconds

Orthomosaic

Tamanho

9,671x10,213

Coordinatesystem

SIRGAS2000/UTMzone24S(EP

SG::31984)

Channels

3,uint8

Modo decombinação

Mosaico

Parâmetros de reconstrução

Surface

Mesh

Enablecolorcorrection

Não

Tempodeprocessamento

1 minutes 17seconds

Software

Version

1.2.6 build2834

Platform Windows 64bit