UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Utilização de dados 3D de alta resolução para detecção de
mudanças em movimentos de massa em Perus, São Paulo (SP)**

LUIZ FERNANDO DOS SANTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Recursos
Minerais e Hidrogeologia para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Recursos Minerais e Meio-
Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de
Carvalho

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Santos, Luiz Fernando dos

Utilização de dados 3D de alta resolução para
detecção de mudanças em movimentos de massa em Perus,
São Paulo (SP) / Luiz Fernando dos Santos;
orientador Carlos Henrique Grohmann. -- São Paulo,
2020.

242 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2020.

1. drones. 2. veículo aéreo não tripulado - VANT.
3. deslizamentos. 4. nuvem de pontos. 5. detecção de
mudança 3D topográfica. I. Grohmann, Carlos
Henrique, orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Utilização de dados 3D de alta resolução para detecção de
mudanças em movimentos de massa em Perus, São Paulo
(SP)**

LUIZ FERNANDO DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Dissertação de Mestrado

Nº 852

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Dr. Eduardo Soares de Macedo

Dr. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli

SÃO PAULO
2020

Para minha família.

Para Catarina e Isadora:

“Em algum lugar, algo incrível está aguardando ser descoberto.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM SUREG-SP) pela oportunidade de realizar o mestrado e aos colegas e aos amigos de instituição pelo apoio, incentivo e conselhos.

À Prefeitura de São Paulo: Defesa Civil Distrital de Anhanguera-Perus pelo apoio em campo, logística, contatos locais e informações essenciais pertinentes à área e ao Geosampa pelos dados e informações disponibilizados. Agradecimentos para José Fernando, Amanda e Luciana.

A orientação do Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann (Guano) que possibilitou a realização desta dissertação e a utilização de drones (!). Aos *spammers* Rafael Albuquerque, Guilherme (Sífilis) e Gabriel Zacharias pela convivência, conversas e, especialmente, pelo apoio nos trabalhos de campo!

Apesar de não ter recebido apoio direto, agradeço à FAPESP (proc. #2016/006628-0) pelo auxílio à pesquisa do orientador e SPAMlab que tornou realidade a utilização de dados 3D em geociências. E à Fundação CAPES pelo Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

Agradeço a toda minha família pelo apoio, incentivo e muita paciência antes, durante e depois do mestrado. Milena, Catarina, Isadora e Frodo, obrigado por entenderem e pelo tempo doado! Aos meus pais, Luiz Alberto (*in memoriam*) e Tereza, por sempre incentivarem, acreditarem e investirem em mim (e nos meus estudos e neste trabalho). Aos Scandis que, apesar de distantes, estão sempre presentes! Tem muito de vocês todos aqui... Obrigado!

Ao meu pai, que me trouxe o interesse pela ciência, e à minha mãe, que me fez desenvolver o gosto pela leitura.

Muito obrigado, mais uma vez, a todos que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho!

“I have no special talent I am only passionately curious”

Albert Einstein (1952)

“The true delight is in the finding out, rather than in the knowing”

Isaac Asimov (1988)

“Man’s greastest asset is the unsettled mind”

Isaac Asimov (1970)

RESUMO

Santos, L.F., 2020, Utilização de dados 3D de alta resolução para detecção de mudanças em movimentos de massa em Perus, São Paulo (SP) [Dissertação de Mestrado], São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 242 p.

Há um aumento da intensidade e frequência de desastres naturais em todo o mundo, especialmente os relacionados aos movimentos de massa (p. ex., deslizamentos), inclusive no Brasil onde vários ocorreram nos últimos anos. O desenvolvimento recente de plataformas e sensores remotos aéreos de coleta de dados, como aeronaves não tripuladas equipados com sensores fotográficos comuns (drones), pode, com um certo nível de planejamento fotogramétrico e processamento de dados, ser usado para entender melhor esses cenários, com resultados positivos na identificação, análise e monitoramento de áreas suscetíveis aos movimentos de massa. O objetivo foi (1) produzir uma extensa e ampla revisão bibliográfica de temas relacionados; (2) o emprego de drones e pontos de controle (GCPs), pela técnica dGNSS, em área suscetível de geodinâmica conhecida (como o Morro Doce, a NW da cidade de São Paulo); (3) uma comparação, por meio de algoritmo apropriado, de dois conjuntos de dados 3D registrados (nuvens de pontos) e gerados a partir de processamento fotogramétrico (SfM-MVS) para detectar alterações topográficas (p. ex., um deslizamento). O primeiro conjunto de imagens, adquirido em 2017, contém um total de 155 imagens e 7 GCPs de <1 cm em precisão XYZ. O segundo, de 2019, compreende 484 imagens e 8 GCPs de <2cm em XY e <4cm em Z. Diante de diferentes arranjos de aquisição de dados (linhas de voo, altura acima do solo, GCPs) e equipamentos, o processamento de dados e o registro obtiveram a melhor qualidade possível por meio de uma análise da configuração inicial, observações de modelos de câmera, filtragem e otimização (ajustamento por feixe de raios) automatizados via *script* Python. A seguir, as nuvens densas, resultantes da etapa MVS, foram filtradas de ruídos e pontos acima do solo e depois segmentadas por uma área comum (cobrindo as feições de instabilidade identificadas na encosta). Após, uma filtragem multi-etapas utilizou um algoritmo especializado (*Cloth Simulation Filter*), as distâncias calculadas para uma superfície/nuvem de referência conhecida (dados LiDAR-ALS) e a remoção manual de pontos resultando em nuvens de pontos comparáveis, livres de objetos (apenas pontos de solo) e com erro de registro de 5cm medido em feições estáveis da encosta (p. ex., afloramentos rochosos). Uma comparação 3D nuvem a nuvem (método M3C2) detectou pequenas mudanças significativas em duas cicatrizes de deslizamento, sugerindo que estas áreas mudaram no intervalo de tempo do estudo, ou, que pontos não-solo ainda estavam presentes apesar da filtragem criteriosa (M3C2 considera a rugosidade das nuvens). Para considerar a origem dos dados (fotogramétrica) e melhorar os resultados, foram incorporados estimativas de precisão dos pontos (M3C2-Precision Maps), resultando em nenhuma alteração significativa detectada e correspondendo ao registro histórico da Defesa Civil local no período. O resultado representa um modelo histórico de mudança mais detalhado do que o monitoramento visual atualmente empregado. A prevenção é um dos principais pilares da gestão de desastres naturais, portanto, os resultados destacam um novo método de prevenção, de última geração e baixo custo, para monitorar movimentos de massa antes que eles ocorram e causem perdas e danos.

Palavras-chave: drones, veículo aéreo não tripulado – VANT, deslizamentos, nuvem de pontos, detecção de mudança 3D topográfica

ABSTRACT

Santos, L.F., 2020, Application of high resolution 3D data for change detection on mass movements at Perus, São Paulo, SP, Brazil [Master's Thesis], São Paulo: Geosciences Institute, University of São Paulo - USP, 242 p.

There is an increase of intensity and frequency of natural disasters around the world, especially in regards to mass movements (e.g., landslides), including in Brazil where several events occurred in recent years. Recent development of airborne remote data collection platforms and sensors such as unmanned aircrafts equipped with over-the-counter photographic sensors (drones) can, with a certain level of photogrammetric planning and data processing, be used to better understand these scenarios, with positive results in the identification, analysis and monitoring of areas susceptible to mass movement (e.g., landslide prone regions). The aim was (1) to produce an extensive and broad bibliographic review of related themes; (2) the usage of drones and ground control points (GCPs), by dGNSS technique, on a known geodynamic susceptible area (such as the Morro Doce slope, NW of São Paulo city); (3) a comparison by means of an appropriate algorithm of two registered 3D datasets (point clouds) generated from photogrammetric processing (SfM-MVS) in order to detect topographic change (e.g., a landslide). The first image set, acquired in 2017, contains 155 total images and 7 GCPs of <1 cm in XYZ precision. The second set, from 2019, comprises 484 images and 8 GCPs of <2cm in XY and <4cm in Z. In the face of different data acquisition arrangements (line of flight, height above ground, GCPs) and equipment, data processing and registration achieved the best possible quality by initial configuration analysis, camera model observations and automated cloud filtering and optimization (bundle block adjustment) via Python script. Then, the dense clouds, resulting from the MVS step, were filtered out of noise and above ground points and segmented to a common area (covering the instability features identified on the slope). Next, a multi-step dense cloud filtering approach took advantage of a specialized filtering algorithm (Cloth Simulation Filter), the calculated distances to a known reference surface/cloud (LiDAR-ALS data) and of a manual removal of points resulting on comparable point clouds free of objects (only ground points) with a registration error of 5cm measured on stable features of the slope (e.g., rocky outcrops). A 3D cloud to cloud comparison (M3C2 method) enabled the detection of changes which resulted in small significative changes for two bare soil landslide scars suggesting that these areas actually changed over the study time range, or that non ground points were still present on both clouds despite the careful filtering (since M3C2 considers cloud roughness). To take the photogrammetric data into account and improve the results, estimates of point precisions (M3C2-Precision Maps) were incorporated, resulting in no significant change detected and matching the local Civil Defense historic record for the time range. This result represents a more detailed historical change model when compared to the visual monitoring technique currently employed. Prevention is a major underpin in natural disaster management, thus the results highlights a new state-of-the-art and low-cost prevention method to monitor mass movements before they occur and cause damage and losses.

Keywords: drones, unmanned aerial vehicle – UAV, landslides, point cloud, topographic 3D change detection

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE SIGLAS	xxi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	5
3.1 Revisão Bibliográfica	5
3.2 Plataformas Aéreas e Câmeras.....	5
3.3 Receptores GNSS.....	8
3.4 Pacotes de <i>Software</i> , <i>Hardware</i> e demais.....	9
3.5 Aquisição e Obtenção de Dados 3D.....	9
3.6 Processamento de Dados	11
3.6.1 Automação e padronização	12
3.7 Nuvens de Pontos e Detecção de Mudanças	13
4. MOVIMENTOS DE MASSA	15
4.1 Classificação de Movimentos de Massa	16
4.1.1 Rastejos.....	22
4.1.2 Deslizamentos ou escorregamentos	23
4.1.3 Quedas, Tombamentos e Rolamentos de Blocos	26
4.1.4 Fluxos ou Corridas.....	27
4.2 Nomenclatura dos deslizamentos.....	28
4.3 Fatores Causadores.....	28
4.3.1 Condicionantes ambientais	31
4.3.2 Processos deflagradores	32
4.4 Estabilidade de Encostas e Taludes.....	37
4.5 Sinais de Instabilização do Terreno.....	39
5. SENSORIAMENTO REMOTO	43
5.1 Fotografia Aérea.....	44
5.1.1 Fotografia Aérea Convencional.....	45
5.1.2 Fotografia Aérea de Pequeno Formato	45
5.1.3 Breve Histórico: fotografia, plataformas e fotogrametria aéreas	45
5.1.4 Avanços recentes	52
5.1.5 Câmeras aéreas e princípios básicos de fotografia aérea.....	54
5.1.6 Fotogrametria digital	60

5.1.7 Fotogrametria por <i>Structure from Motion</i> - SfM	64
5.2 <i>Light Detection and Ranging</i> – LiDAR	71
5.3 Aplicação das Técnicas de Aquisição de Dados 3D	72
5.4 Filtragem e Classificação de Nuvens de Pontos	76
5.5 Detecção de Mudanças	80
6. RESULTADOS	87
6.1 Área de Estudo	87
6.2 Geologia Regional	88
6.3 Geologia Local	90
6.4 Aspectos Geológico-Geotécnicos	93
6.4.1 Histórico e Evolução dos Movimentos de Massa	97
6.4.2 Características dos movimentos de massa	100
6.5 Aquisição de Dados de Campo	102
6.6 Processamento GNSS	105
6.7 Conversões, calibrações das câmeras e análise das aquisições	110
6.7.1 Parâmetros de entrada e filtragem de erros	116
6.8 Processamento SfM-MVS	128
6.9 Processamento LiDAR – ALS	133
6.10 Filtragem das Nuvens SfM-MVS	138
6.10 Detecção de Mudanças	140
7. DISCUSSÃO	149
8. CONCLUSÕES	155
Referências	157
APÊNDICE A – Artigo submetido ao XIX SBSR, Santos (SP) - 14 a 17/04/2019 e pôster	171
APÊNDICE B – Rotina Python para processamento SfM	177
ANEXO A – Relatório do processamento da aquisição SfM de 2017	187
ANEXO B – Relatório do processamento da aquisição SfM de 2019	193
ANEXO C – Relatórios dos processamentos GNSS de 2017 (exceto os residuais)	199
ANEXO D – Relatórios dos processamentos GNSS de 2019 (exceto os residuais)	208

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Passos metodológicos executados neste trabalho.....	6
Figura 2 – Receptor GNSS SP60: (1) painel de controle, (2) LED do <i>bluetooth</i> , (3) LED de gravação de dados, (4) LED ligado/desligado, (5) liga/configurações, (6) LED de posicionamento, (7) LED rádio UHF, (8) montagem do monopé, (9) conector de dados, (10) bateria, (11) conector USB, (12) proteção anti choque e (13) marca da altura da antena. Fonte: modificado de Spectra Precision (2016), p.7.....	8
Figura 3 – Planejamento de voo. (A) Captura de tela do aplicativo MP-DME para dispositivo móvel. (B) Conferência pré-voo do planejamento realizado. Fonte: Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera.	10
Figura 4 – Nuvem de pontos: classificação de pontos do terreno e de objetos (e geração de modelos digitais de superfície e terreno). Os pontos fotogramétricos representam pontos de superfície (não há penetração em vegetação), incluindo objetos (vegetação e construções, p. ex.). Os pontos LiDAR permitem a obtenção de pontos do solo e dos localizados acima por sua característica.	13
Figura 5 – Desenhos esquemáticos dos tipos principais de movimentos de massa. (A) Rastejo (<i>creep</i>); (B) deslizamentos: (B1) planar, (B2) rotacional e (B3) em cunha; (C) movimentos com blocos rochosos: (C1) quedas (<i>falls</i>), (C2) tombamentos (<i>topple</i>), (C3) rolamentos e (C4) deslocamentos; (D) fluxo (<i>flow</i>). Fonte: U.S. Geological Survey (2004), a partir das figuras ilustrativas de Varnes (1978); Reis (2001).	21
Figura 6 – Encosta, em primeiro plano, com sinais do processo de rastejo (terracetes), possivelmente acelerado pela remoção da cobertura vegetal e uso para pastagem. Próximo ao Pico do Jaraguá. Fonte: fotografia tirada pelo autor na Rua da Cascata, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP.....	23
Figura 7 – Cicatriz de deslizamento translacional, condicionado por ação antrópica de desmatamento, cortes e aterros, induzindo a concentração de água em superfície, no topo da cicatriz. Localizada na vertente norte-nordeste de alta declividade da Serra do Morro Doce. Fonte: fotografia tirada pelo autor no Bairro Itaberaba II, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP.....	24
Figura 8 – Movimentos de blocos: (A) queda em talude de corte para estrada em José Boiteux, SC em rochas sedimentares. (B) Tombamento em talude de corte rodovia em Amparo, SP. Fonte: fotografias tiradas pelo autor.....	26
Figura 9 – Parte superior da bacia do rio Guarda-Mão, ao fundo, com deslizamentos de solo e rocha e, em primeiro plano, área de deposição do fluxo ocorrido em 2010, Itaóca, SP. Fonte: Gramani (2015).	28
Figura 10 – Figura simples de um deslizamento rotacional, parcialmente evoluído para um fluxo de terra, com as nomenclaturas usuais a partir do estabelecido internacionalmente. Fonte: modificado de Varnes (1978) e Highland e Bobrowski (2008).	29
Figura 11 – Deslizamentos ocorridos em 2011, na Região Serrana do Rio de Janeiro, após chuvas intensas. Fonte: modificado de Fernandes (2013).	34
Figura 12 – Deslizamento planar raso deflagrado por chuvas intensas de 2009 em talude de corte, sem contenção, em ocupação precária na vertente norte-noroeste do Morro Doce. Fonte: fotografia tirada pelo autor, no Distrito Anhanguera, Bairro Itaberaba II, São Paulo, SP.....	36
Figura 13 – Ação antrópica: (A) deslizamento planar raso deflagrado por chuvas intensas de 2009 e ruptura de fossa séptica em ocupação na vertente N-NW do Morro Doce. Fonte: fotografia tirada pelo autor, no Bairro Itaberaba II. (B) Contraste na distribuição de movimentos de massa entre encostas vegetadas e pastos desflorestados na Nova Zelândia. Fonte: Crozier (2010), p.266...37	37
Figura 14 – Condição de estabilidade de encostas e taludes em função da inclinação do terreno, considerando a semelhança com o mecanismo de deslizamento entre corpos sólidos ao que se passa internamente no solo a título de ilustração da atuação das forças mobilizadoras e de resistência ao cisalhamento. Fonte: elaborado pelo autor.....	39
Figura 15 – Feições de instabilidade: (A) ilustração dos efeitos de erosão em um deslizamento e seus sinais de instabilização (Brabb, 1991) e (B) exemplos das feições. Fonte: autor.....	41
Figura 16 – Primeiras fotografias aéreas.....	47
Figura 17 – Uso da fotografia aérea em combate.....	49

Figura 18 – Recorte do Mapa Topográfico do Município de São Paulo, de 1930 (1:5.000), realizado a partir de restituição aerofotogramétrica pela empresa SARA Brasil S/A. Fonte: PMSP (2019).	51
Figura 19 – VANT comercial desmontado, com os subsistemas eletrônicos miniaturizados de controle e navegação, posicionamento, propulsão, rádio comunicação, sensores, entre outros. Fonte: modificado de Torborg (2018).	53
Figura 20 – Tipos de plataformas de RPAs para fotografia aérea, mapeamento e inspeções. Fonte: divulgação das empresas fabricantes dos RPAs.	54
Figura 21 – Elementos óticos de uma câmera aérea. Fonte: modificado de Farnik (2010), baseado em Jensen (2009, p. 98).	55
Figura 22 – Obturadores de câmeras: (A) relação entre o valor de f/stop com abertura do diafragma mecânico de uma objetiva. (B) Efeito <i>rolling shutter</i> em uma cena estática e uma dinâmica.	56
Figura 23 – Comparação de fotografias aéreas modificadas digitalmente para fins ilustrativos de exposição, com seus respectivos histogramas RGB abaixo: (a) subexpostas (-2,0), (b) exposição correta capturando o máximo possível de sombras e realces da cena, e (c) superexpostas (+2,0). Notar a perda de nitidez, contraste e de informações interpretativas em ambos os extremos. Fonte: elaborado pelo autor.	57
Figura 24 – Importância do campo de visada angular em consequência da objetiva (esquerda) para uma mesma altitude de voo e diferentes ângulos, e (direita) para diferentes altitudes de voo com a mesma objetiva. Fonte: modificado de Jensen (2009, p. 101).	59
Figura 25 – Formas de obtenção de fotografias aéreas: (A) nadir e (B) off-nadir. Fonte: modificado e traduzido de Jensen (2009, p. 96).	59
Figura 26 – Geometria de um modelo estéreo orientado. Fonte: traduzido de Linder (2009), p.2.	61
Figura 27 – (A) Linhas de voo e (B) blocos fotogramétricos. Fonte: modificado de Jensen (2009, p. 152).	62
Figura 28 – Conceito de <i>Ground Sample Distance</i> (GSD). Fonte: modificado de Kluger (2008).	63
Figura 29 – Diferentes configurações de voo para obtenção de GSDs e sobreposições uniformes. (A) múltiplos voos em sobreposição; (B) voo único seguindo a morfologia do terreno; (C) voos em sobreposição seguindo a morfologia do terreno; e (D) voos em diferentes alturas sobre o solo em sobreposição e seguindo a morfologia do terreno. Fonte: elaborado pelo autor.	63
Figura 30 – Processo SfM: desde a entrada de imagens até a reconstrução 3D esparsa inicial.	66
Figura 31 – Exemplos de alvos artificiais e de alvos naturais. Fonte: Agisoft (2019a), http://geodrones.com.br/blog/ (acesso em 26/09/2017) e fotos tiradas pelo autor.	67
Figura 32 – Diferença de visualização de um alvo de 0,40m de lado conforme a altura de voo sobre o solo e em câmeras distintas (12MP <i>rolling shutter</i> e 21MP <i>global shutter</i>). Fonte: elaborado pelo autor.	68
Figura 33 – Coleta de pontos de apoio utilizando alvos por sistema de posicionamento global GNSS, método diferencial. Fonte: fotografias tiradas pelo autor.	69
Figura 34 – LiDAR aéreo: (A) Esquema LiDAR com a unidade laser aeroportada, padrão de perfilamento no solo, posicionamento da aeronave e sistemas de medição. Fonte: modificado de Webster et al. (2004). (B) Os retornos múltiplos de um disparo laser individual.	72
Figura 35 – Plataformas de coleta remota de dados 3D utilizadas para mapeamento e monitoramento de maciços. Fonte: modificado de Lato et al., (2015a) e Hutchinson et al., (2015).	74
Figura 36 – Distâncias C2C e C2C-HM: (A) comparação entre nuvem referência e nuvem comparada e a diferença entre a diferença entre as distâncias medida e verdadeira, (B) utilizando a estatística de vizinhos mais próximos e (C) utilizando modelagem local para melhorar a distância medida.	82
Figura 37 – (A) Comparação C2M entre modelo e nuvem comparada. (B) Método M3C2: (1) escala para cálculo da normal D (ilustrado na nuvem 1) e (2) escala para a projeção do cilindro d , paralelo à normal, para cada ponto núcleo i , interceptando as nuvens. O comprimento do cilindro corresponde à máxima distância de busca por pontos para calcular a posição média das superfícies, i_1 e i_2 , utilizadas no cálculo da distância entre nuvens. O nível de confiança local utiliza o tamanho e rugosidade local das nuvens inseridas no cilindro. (C) Metodologia M3C2-PM para detecção de mudanças com dados SfM utilizando mapas de precisão para aprimorar o nível de confiança local. Fonte: Barnhart e Crosby (2013); Lague et al. (2013); James et al. (2017b).	83

Figura 38 – Localização (A) da área de estudo. Fonte: Google Earth; CPRM e IPT (2014). (B) Vertente do Morro Doce com destaque para a região com movimentos de massa. Fonte: tirada pelo autor.	87
Figura 39 – Mapa geológico regional: 1. Sedimentos; 2. Granitos; 3. Domínio Socorro-Guaxupé; 4. Domínio Embu; 5. Domínio Apiaí-São Roque: grupos Açungui e São Roque; 6. Grupo Serra do Itaberaba; 7. Área de estudo. Fonte: modificado de Henrique-Pinto et al. (2014).	89
Figura 40 – Mapa geológico do noroeste de São Paulo, distritos de Anhanguera e Perus. Fonte: modificado de Coutinho (1980).	92
Figura 41 – (A) Mapa de declividade, com destaque para a área de estudo. (B) Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. Destaque para a área de estudo onde a classe alta é predominante. Fonte: modificado de CPRM e IPT (2014).	94
Figura 42 – (A) e (B) blocos rolados metaconglomerados na meia encosta observados na trilha. São encontrados até proximidades da ocupação do Jardim Jaraguá. Fonte: fotografias tomadas pelo autor.	95
Figura 43 – Síntese dos levantamentos geológico-geotécnicos realizados para implantação dos túneis e emboque Jesus do Rodoanel Mario Covas, trecho Oeste, na mesma vertente da área de estudo do Morro Doce (500 metros de distância): (A) planta de locação das sondagens e estruturas levantadas; e (B) perfil longitudinal geológico-geotécnico, com destaque para uma das seções transversais levantadas (SP-504 a SP-505) onde é delimitado um corpo de tálus com espessura de cerca de 6 metros. Notar que as sondagens encontram-se deslocadas para caracterização dos respectivos perfil e seção transversal. Fonte: modificado de DERSA (1995).	96
Figura 44 – Evolução histórica recente, por meio de fotografias aéreas nadir e oblíquas, ortofotos e fotografias de chão, dos movimentos de massa do Morro Doce, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP: 2004 a fotografia aérea não indica cicatrizes recentes na encosta apesar de ser visível a deposição de blocos; 2007 o primeiro registro fotográfico dos rompimentos condicionados por chuvas acumuladas seguidas de chuvas intensas e a evolução ao longo dos anos. Fonte: fotografias de chão tomadas pela Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera e pelo autor. Fotografias aéreas <i>nadir</i> PMSP (2019a), Emplasa (2010) e autor.	97
Figura 45 – Médias mensais para a região de Perus baseado na estação E3-030 do DAEE-SP (1934 a 1997). Pluviometria registrada pela Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera para os anos de 2007, 2009 e 2012 para comparação com a média. Fonte: DAEE (2019), PMSP (2019b).	99
Figura 46 – Queimadas no Morro Doce, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP: (A) em setembro de 2012 e (B) o efeito em outubro de 2012 ajudando na reativação dos deslizamentos (notar material deslizado na encosta). Fonte: Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera e autor, respectivamente.	99
Figura 47 – Características da cicatriz 1 (C1): perfil e aspecto em planta.	101
Figura 48 – Características da cicatriz 2 (C2): perfil e aspecto em planta.	101
Figura 49 – (A) Mapa da aquisição de dados de campo de 2017: dois voos realizados a alturas sobre o solo diferentes e coleta de dados GNSS. (B) Detalhe da coleta de pontos GNSS pelo receptor móvel.	102
Figura 50 – (A) Mapa da aquisição de dados de campo de 2019: voo único realizado e coleta de dados GNSS. (B) Detalhe da coleta de dados GNSS pelo receptor móvel, no bairro e na encosta.	104
Figura 51 – Distribuição das chuvas de acordo com a estação pluviométrica Jardim Anhanguera: (A) em acumulado diário e (B) acumulado mensal. Fonte: Cemaden (2019).	105
Figura 52 – Relação entre altitude elipsoidal (obtida por sistemas GNSS), altitude ortométrica (relativa ao nível médio do mar) e altura geoidal fornecida pelo MAPGEO2015. Fonte: modificado IBGE (2016).	107
Figura 53 – Gráficos de distorção resultantes do processo de calibração prévia das câmeras utilizadas nas aquisições de 2017 (FC330_3.61_C_rolling_shutter) e 2019 (FC6310_8.8_B).	112
Figura 54 – Métricas de qualidade: (A) erro de reprojeção. Fonte: modificado de http://support.pix4d.com/ (B) Incerteza da reconstrução 3D: notar a diferença entre linhas de base curtas e longas. (C) Acurácia da projeção: relacionada aos tamanhos (escalas) dos pontos (feições) nas	

imagens. Fonte: Moons et al. (2008). (D) Contagem da imagem, ou multiplicidade dos pontos homólogos, é relacionada à sobreposição efetiva. Fonte: Agisoft Community Forum (2019).....	118
Figura 55 – Parâmetros pelo aumento do número de <i>key points</i> para alinhamento <i>Highest</i> . Fonte: elaborado pelo autor (ASMS v.1.5.1).	120
Figura 56 – Parâmetros pelo aumento do número de <i>key points</i> para alinhamento <i>High</i> . Fonte: elaborado pelo autor (ASMS v.1.5.1).	122
Figura 57 – Fluxograma do programa Python inserido no ASMS v.1.5.1 para automatização do processamento das fotografias aéreas obtidas nas aquisições de 2017 e 2019 (Apêndice B)...	125
Figura 58 – Aquisição 2017: (A) sobreposição das imagens e posição das câmeras; (B) Localização dos pontos de apoio: controle e verificação com as respectivas estimativas de erros; (C) Vista 3D da nuvem densa com os pontos de apoio e posições das câmeras. Aquisição 2019: (D) sobreposição das imagens e posição das câmeras; (E) Localização dos pontos de apoio: controle e verificação com os respectivos de erros; (F) Vista 3D da nuvem densa com os pontos de apoio e posições das câmeras.	129
Figura 59 - (A) Exemplo de par de imagens excluídas do processamento (sem número suficiente de feições, ou correspondências válidas). (B) Imagens com erros residuais elevados. As imagens estão escurecidas para visualização dos pontos.	130
Figura 60 – Distribuição espacial dos erros de reprojeção por pontos das nuvens esparsas para 2017 e 2019 e histogramas comparativos dos erros por ponto da filtragem automática.	131
Figura 61 – (A) Segmentação das bordas das nuvens e (B) filtragem <i>low noise</i> : pontos destacados abaixo da superfície de referência são provenientes de ruídos da reconstrução MVS.	133
Figura 62 – Articulação dos dados e nuvem de pontos ALS resultante da etapa (1) de processamento.	135
Figura 63 – Vista 3D dos produtos gerados LiDAR-ALS e das distâncias entre a nuvem classificada originalmente (8), uma superfície gerada a partir dela (9), e uma nuvem de pontos gerada por filtragem por blocos mínimos com lado de 5m (10).	136
Figura 64 – Vista 3D das feições de instabilidade identificadas por inspeção visual de dados 3D, coloridos artificialmente por altura, provenientes de LiDAR-ALS classificados como solo (<i>bare ground</i>) na encosta do Morro Doce, São Paulo (SP).....	136
Figura 65 – Depósito de acumulação de encosta inferido em planta (sobre nuvem de pontos colorido por altura) e perfil A-A' com retornos do solo e da superfície.	137
Figura 66 – Nuvens de pontos com cores RGB de 2017 e 2019 cobrindo área com feições de instabilidade (indicadas com traços verdes) e blocos e afloramentos rochosos (indicados).	139
Figura 67 – Nuvens resultantes da filtragem combinada entre algoritmo CSF, por distâncias C2M (dados SfM para os LiDAR-ALS) e manual para extração dos pontos de solo.	140
Figura 68 – Diferentes perfis para as cicatrizes C1 (esquerda) e C2 (direita), dos anos de 2017 e 2019, comparando a classificação de pontos de solo (<i>ground</i>) e não solo (<i>non-ground</i>), vegetação, p.e.	141
Figura 69 – Erro de registro entre as nuvens de 2017 e 2019: média de $4,93 \pm 2,9$ cm para nove áreas consideradas estáveis entre as aquisições de dados SfM.	142
Figura 70 – Vista 3D das incertezas das distâncias calculadas pelo M3C2 e a variação das normais.	143
Figura 71 – Vista 3D das distâncias M3C2 calculadas e se houve mudanças significativas de acordo com variação espacial da rugosidade local e o erro de registro de 5 cm.	144
Figura 72 - Precisões em milímetros das coordenadas dos pontos das nuvens esparsas de (A) 2017 e (B) 2019, considerando 4000 iterações em uma abordagem Monte Carlo (James et al., 2017b).	145
Figura 73 – Vista 3D do resultado do cálculo variante M3C2-PM se houve, ou não, mudanças significativas (erro de registro de 5cm): não houve mudança significativa. Notar a mudança em relação à Figura 71, onde o escalar de mudança significativa considerou a rugosidade local (M3C2).	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais especificações das plataformas aéreas e câmeras utilizadas.	7
Tabela 2 – Estimativa de resolução por plataforma e cobertura imageada em terreno para diferentes alturas de voo sobre o solo.	7
Tabela 3 – Principais características dos dados LiDAR obtidos (PMSP, 2019a).	10
Tabela 4 – Sumário simplificado da classificação de Varnes (1978) para movimentos de massa (traduzido de Varnes, 1978, p. 1).	17
Tabela 5 – Classe de velocidade de processos de movimento de massa (modificado de Hungr et al., 2014, em tradução livre do autor).	18
Tabela 6 – Comparação entre algumas das propostas brasileiras de classificação dos movimentos de massa (modificado de Fernandes e Amaral, 2000 e Augusto Filho, 1992).	19
Tabela 7 – Principais tipos de movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.	20
Tabela 8 – Fatores deflagradores dos movimentos de massa para Varnes (1978).	29
Tabela 9 – Agentes e causas dos movimentos de massa para Guidicini e Nieble (1984).	30
Tabela 10 – Principais condicionantes de movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.	31
Tabela 11 – Alterações antrópicas em ambiente urbano causadoras de instabilidade (Cerri, 1992).	36
Tabela 12 – Principais aplicativos para dispositivos móveis para mapeamento aéreo: planejamento e controle automático.	70
Tabela 13 – Considerações topográficas para selecionar o SR 3D mais adequado ao projeto.	75
Tabela 14 – Resolução de dados requeridos para tarefas de análise de dados 3D a as tecnologias associadas e recomendadas para coleta de dados.	76
Tabela 15 – Resultados do processamento de correção do posicionamento das bases BP1, BP2 e BP3 em relação às estações de referência RBMC com efemérides.	107
Tabela 16 – Resultados do processamento de correção do posicionamento das bases BP1, BP2 e BP3 em relação às estações de referência RBMC com efemérides finais (precisas).	108
Tabela 17 – Aquisição 2017: Posicionamento pós-processado, com efemérides precisas, dos pontos de apoio coletados em campo, na campanha de 11/10/2017, e corrigidos por BP1.	109
Tabela 18 – Aquisição 2019: Posicionamento pós-processado, com efemérides precisas, dos pontos de apoio coletados em campo nas campanhas de 05 e 10/06/2019 e corrigidos por BP2 e BP3, respectivamente.	110
Tabela 19 – Modelos, parâmetros de orientação interna e respectivos erros nos pontos de apoio.	111
Tabela 20 – Calibração prévia das câmeras: parâmetros de OI e coeficientes de distorção.	112
Tabela 21- Matrizes de correlação dos POIs das câmeras FC330_C e FC6310_B.	113
Tabela 22 – Comparação entre processamentos ASMS de conjuntos de imagens pré-processadas.	113
Tabela 23 – Comparação entre processamentos dos voos #1-2017 e #2-2017 realizados em alturas sobre o solo diferentes, com sobreposição entre eles, no ASMS.	115
Tabela 24 – Métrica qualidade das imagens para as aquisições de 2017 e 2019.	117
Tabela 25 – Descrição dos principais comandos Python aplicados no programa.	124
Tabela 26 – Efeitos da altura sobre o solo e velocidade da plataforma sobre o VPD.	127
Tabela 27 – Sumário dos resultados dos processamentos para as aquisições de 2017 e 2019.	130
Tabela 28 – Valores dos erros RMSE para os pontos de controle e de verificação: 2017 e 2019.	132
Tabela 29 – Resultados da análise das precisões das coordenadas dos pontos para 2017 e 2019.	146

LISTA DE SIGLAS

AFR	Ajustamento por Feixe de Raios
ALS	<i>Airborne Laser Scanner</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
ATIN	<i>Adaptive Triangular Irregular Network</i>
BCAL	<i>Boise Centre for Aerospace Laboratory LiDAR Algorithm</i>
C2C	<i>Cloud to Cloud Distance</i>
C2C-HM	<i>Cloud to Cloud Distance Height Model</i>
C2M	<i>Cloud to Model/Mesh Distance</i>
CSF	<i>Cloth Simulation Filter</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DoD	<i>Digital Elevation Model of Difference, DEM of Difference</i>
DRONE	Nome popular para aeronaves não tripuladas e remotamente pilotadas
FA	Fotogrametria Aérea
FAO	Fotografia Aérea Oblíqua
FT	Fotogrametria Terrestre
GCP	<i>Ground Control Points</i> (Ponto de Controle)
GLONASS	Sistema de Navegação Global por Satélite Russo
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology</i>
IBF	<i>Interpolation-based Filter</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ICP	<i>Iterative Closest Point</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISPRS	<i>International Society of Photogrammetry and Remote Sensing</i>
LA	LiDAR Aéreo
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LdF	Limite de Feições

LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LM	LiDAR Móvel
LPH	Limite de Pontos Homólogos
LT	LiDAR Terrestre, ou, Laser Escâner Terrestre
M3C2	<i>Multiscale Model to Model Cloud Comparison</i>
M3C2-PM	<i>Multiscale Model to Model Cloud Comparison – Precision Maps</i>
MCC	<i>Multiscale Curvature Classification</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
OE	Orientação Externa
OI	Orientação Interna
PDOP	<i>Positioning Dilution of Precision</i>
PMF	<i>Progressive Morphological Filter</i> (Filtro Progressivo Morfológico)
POI	Parâmetros de Orientação Interna
PPK	<i>Post Processing Kinematics</i>
PTIN	<i>Progressive Triangular Irregular Network</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
REM	Radiação Eletromagnética
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i> (Aeronave Remotamente Pilotada)
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft Systems</i> (Sistema Aeronave Remotamente Pilotada)
RTK	<i>Real Time Kinematics</i>
SBF	<i>Slope Based Filter</i> (Filtro Baseado em Declividade)
SfM-MVS	<i>Structure from Motion – Multi-View Stereo</i>
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>
SR	Sensoriamento Remoto
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanning</i> (Laser Escâner Terrestre)
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i> (Sistema Aéreo Não Tripulado)
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (Veículo Aéreo Não Tripulado)
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VPD	<i>Vertical Pixel Displacement</i>
WLS	<i>Weighted Least Squares</i>
WP-WLI	<i>Working Party – World Landslides Inventory</i>

1. INTRODUÇÃO

No mundo todo há o registro um aumento da intensidade e frequência dos desastres naturais, proveniente do aumento da exposição de moradias, infraestrutura e ativos econômicos às ameaças naturais e pelas mudanças climáticas globais (Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres CEPED, 2016).

Os desastres decorrentes de movimentos de massa têm ocorrido com maior frequência nos últimos anos no Brasil e as causas apontadas são a ocupação altamente vulnerável e desordenada, devido à falta de planejamento urbano, e as precipitações intensas e concentradas, principalmente nas regiões de relevo ondulado suscetíveis a processos geodinâmicos adversos.

Portanto, o Brasil não é exceção à tendência mundial, e acumula um histórico recente de desastres relacionados aos movimentos de massa e às inundações causados por extremos climáticos: 2008-Santa Catarina, 2010-Pernambuco e Alagoas, 2010-São Luís do Paraitinga em São Paulo, 2011-Rio de Janeiro, 2012-Itaóca em São Paulo, 2013-Espírito Santo e 2016-Região Metropolitana de São Paulo. Os movimentos de massa são mais comuns nas regiões sudeste, sul e nordeste (Tominaga, 2012), sendo processos naturais ou induzidos responsáveis por perdas e danos de intensidade além da resiliência das comunidades afetadas.

O Banco Mundial aponta que de 2008 a 2011 o Brasil acumulou prejuízos econômicos da ordem de R\$ 15,5 bilhões, consequência de movimentos de massa, inundações e processos correlatos de grande magnitude. Adiciona-se, ainda, o valor de mais de R\$ 4 bilhões que o governo brasileiro destinou às ações de recuperação das áreas afetadas no período de 2008 a 2013 (Banco Mundial, 2012a; Banco Mundial, 2012b; CEPED, 2016).

Estas estimativas econômicas estão, provavelmente, ultrapassadas desde os desastres mais recentes como os da Região Metropolitana de São Paulo, em 2016, e da Baixada Santista, em 2020, além do contínuo esforço de se estruturar a gestão integrada de riscos envolvendo união, estados e municípios.

O cenário brasileiro de riscos em meio à ocorrência de extremos climáticos incorre na necessidade de pesquisa contínua na temática dos riscos geológicos. A gestão dos riscos de desastres passa pela identificação, caracterização e análise de processos adversos, como os movimentos de massa, incluindo a pesquisa em novas tecnologias aplicadas nestas ações, como as geotecnologias.

As geotecnologias são um conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e geração de produtos georreferenciados, composto de *hardware*, *software* e pessoas. Exemplos são o sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica, sistemas de posicionamento global, entre outros. Estão associadas, em geociências, na caracterização, avaliação e solução de problemas decorrentes da ocupação humana do meio físico (Rosa, 2005; Bitar et al., 2000).

Seu uso tem se tornado mais frequente pela facilidade e rapidez de coleta de dados geoespaciais, tal como a prática do governo japonês de prover informações geoespaciais para avaliação e resposta a desastres, incluindo o uso de aeronaves não tripuladas para coleta de dados e construção de modelos 3D para subsidiar a mitigação e prevenção de riscos remanescentes, e a resposta e recuperação de áreas afetadas (*Geospatial Information Authority of Japan GSI-DCG*, 2016). O emprego deste tipo de aeronaves para identificação, análise e monitoramento de sinais de instabilidade, com geração de produtos georreferenciados, representa um significativo passo tecnológico que traz vantagens e flexibilidade em detrimento de outras maneiras de captura de dados. Outro exemplo, em geociências, é a utilização do perfilamento a laser a partir de plataformas aéreas, ou, terrestres.

A utilização integrada das geotecnologias permite visualizar com detalhes as informações geoespaciais, de áreas específicas, por meio de dados e modelos 3D, fotografias aéreas, ortofotos, linhas de contorno, curvas de nível e modelos digitais de elevação de alta resolução.

As técnicas de aquisição de dados 3D aplicadas ao estudo de movimentos de massa e processos correlatos de encosta permitem o monitoramento, análises geomorfométricas e geomórficas de terreno, assim como:

- Inspeção visual de relevos sombreados para identificação de instabilidades e suas geometrias;
- Análise temporal por múltiplas aquisições, ou, por comparação com outras fontes de dados para monitoramento e análise de processos em encostas;
- Obtenção de geometria de feições estruturais (análise estrutural), quando aplicável;
- Distribuição, geometria e quantificação de movimentos de massa;
- Produtos como plantas, perfis, medidas entre pontos, cálculos volumétricos, linha de visada e outros, como cartas topográficas e ortofotos.

2. OBJETIVOS

Detecção de mudanças em topografia, ou, em feições de instabilidade, em encosta altamente suscetível aos movimentos gravitacionais de massa, pela utilização integrada de técnicas de obtenção, processamento e análise de dados 3D, de alta resolução, tais como a fotogrametria aérea por *Structure from Motion-Multi-View Stereo* (SfM-MVS) e o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) aeroportado (ALS, *Airborne Laser Scanner*).

Apesar de relacionados aos passos metodológicos desenvolvidos no trabalho, foram definidos objetivos específicos:

- Revisão bibliográfica dos diferentes temas envolvidos: caracterização geológica, aspectos geológico-geotécnicos, movimentos de massa (tipos, classificação, fatores causadores, deflagração), fotografias aéreas e fotogrametria digital por SfM-MVS, veículos aéreos não tripulados (drones), perfilamento a laser, filtragem de nuvem de pontos, detecção de mudanças;
- Geração de nuvens de pontos densas por técnicas fotogramétricas conjugadas com visão computacional (SfM-MVS), utilizando fotografias aéreas adquiridas por aeronaves não tripuladas (drones) em diferentes períodos em encosta suscetível a movimentos gravitacionais de massa;
- Processamento padronizado para geração dos dados 3D SfM-MVS com parâmetros de entrada otimizados e observação de modelos de câmera para minimização de erros e influências manuais (usuário);
- Integração dos produtos fotogramétricos com os dados LiDAR e dados físicos disponíveis para a área de pesquisa (geologia, aspectos geotécnicos, pluviometria, entre outros) para análise interpretativa dos resultados.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As etapas que compreenderam as atividades executadas neste trabalho para alcançar os objetivos propostos foram (Figura 1):

- 1) Revisão bibliográfica de temas relevantes ao desenvolvimento do trabalho;
- 2) Definição de área com alta suscetibilidade para processos gravitacionais de massa, ou com histórico de movimentos de massa, para aplicação de técnicas de coleta e comparação de dados 3D;
- 3) Obtenção de dados 3D LiDAR aéreo para referência aos demais dados;
- 4) Aquisição de dados 3D fotogramétricos SfM-MVS, por meio de veículos aéreos não tripulados, em pelo menos 2 épocas diferentes;
- 5) Processamento dos dados e geração de produtos;
- 6) Comparação entre épocas de aquisição dos dados 3D para identificar e analisar detecção de mudanças topográficas;
- 7) Apresentação, análise, discussão dos resultados e conclusões.

3.1 Revisão Bibliográfica

O levantamento bibliográfico realizado abarca os temas que formam o arcabouço técnico e teórico, alcançado ao longo do período de desenvolvimento deste trabalho, para aplicação dos procedimentos metodológicos. O item 4, Movimentos de massa, englobou classificação de movimentos de massa, estabilidade de encostas e sinais de instabilidade. O item 5, Sensoriamento remoto, por sua vez, englobou fotogrametria digital por SfM-MVS, perfilamento a laser aeroportado, técnicas de comparação de nuvens de pontos e detecção de mudanças topográficas.

3.2 Plataformas Aéreas e Câmeras

Os drones (RPAS – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas) utilizados, DJI Phantom 4 e DJI Phantom 4 Pro, contam com receptores GNSS de navegação embarcados (GPS-NAVSTAR e GLONASS) de precisão de 1 a 10 m e câmeras de 12,4 MP e 20 MP, respectivamente. A estabilização de imagem e a posição da câmera (nadir, ou, oblíqua) ocorre por um mecanismo de compensação em três eixos (*gimbal*) (Tabela 1). A diferença das câmeras incorre em estimativas de resolução e cobertura imageada em terreno diferentes (Tabela 2).

Figura 1 – Passos metodológicos executados neste trabalho.

A localização espacial dos drones é resolvida com uso de sistemas de posicionamento por satélites de navegação, como o GPS-NAVSTAR/GLONASS. Outros sensores também são empregados, tais como a Unidade de Medição Inercial (IMU, do inglês *Inertial Measurement Unit*) e os sensores de bússola, que, combinados, fornecem uma estimativa de localização global permitindo a mitigação de imprecisões do sistema por satélite e a degradação do sinal.

Os dados de posicionamento são registrados e gravados nas fotografias aéreas quando elas são obtidas (metadados EXIF). Dependendo da aplicação, as informações do GNSS de navegação (acurácia até 2m com imagens de baixa altura sobre o solo) podem ser suficientes, porém, se necessário, esta imprecisão pode ser melhorada durante o processamento das imagens mediante pontos de apoio do terreno (pontos de controle e verificação), de modo que a acurácia alcance de 0,05 a 0,2 m, dependente da resolução das imagens e outros parâmetros (Strecha, 2011).

Tabela 1 – Principais especificações das plataformas aéreas e câmeras utilizadas.

Plataformas Aéreas
	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4 Pro	
Alcance – controle (m)	5.000	7.000	
Autonomia (min)	28	30	
Peso (g)	1.380	1.388	
Tamanho (mm)	350	350	
Velocidade (km/h)	72 – modo S	72 – modo S	
Sistemas GNSS	GPS / GLONASS	GPS / GLONASS	
Câmeras
Sensor CMOS	FC330	FC6310	
Tamanho (mm)	6,2x4,65	13,2 x 8,8	
(polegadas)	1/2,3"	1"	
Tamanho Pixel (µm)	1,56 x 1,56	2,41 x 2,41	
Resolução efetiva (MP)	14,4	20	
Lente	FOV 94° - 20mm f/2.8 no infinito	FOV 84° - 24mm f/11 no infinito	
ISO	100-1600	100-3200 (auto)	
Obturador Eletrônico	8 - 1/8000 s	8 - 1/8000 s	
Obturador Mecânico	-	8 - 1/2000 s	
Tamanho Imagem (pix)	4000 x 3000 (4:3)	5472 x 3648 (3:2)	
Estabilização (<i>gimbal</i>)	3 eixos	3 eixos	

Fonte: DJI (2019).

Tabela 2 – Estimativa de resolução por plataforma e cobertura imageada em terreno para diferentes alturas de voo sobre o solo.

Altura de Voo (m)	DJI Phantom 4			DJI Phantom 4 Pro		
	Resolução (cm/pix)	Cobertura (m)	Cobertura (m²)	Resolução (cm/pix)	Cobertura (m)	Cobertura (m²)
30	1,31	52,43 x 39,33	2.065,81	0,87	44,95 x 29,98	1.347,60
40	1,75	69,91 x 52,45	3.672,55	1,16	59,93 x 39,97	2.395,40
50	2,19	87,40 x 65,60	5.738,36	1,45	74,91 x 49,96	3.742,50
60	2,63	104,90 x 78,70	8.263,24	1,75	89,90 x 59,96	5.390,40
70	3,06	122,34 x 91,80	11.247,19	2,04	104,88 x 69,95	7.336,35
80	3,50	139,82 x 104,90	14.690,21	2,33	119,86 x 79,94	9.581,60
90	3,94	157,30 x 118,01	18.592,30	2,62	134,85 x 89,94	12.128,40
100	4,37	174,80 x 131,12	22.953,45	2,91	149,83 x 99,93	14.972,51
110	4,81	192,30 x 144,24	27.773,68	3,20	164,82 x 109,92	18.117,01
120	5,25	209,75 x 157,35	33.052,97	3,49	179,80 x 119,92	21.561,61

Fonte: elaborado pelo autor utilizando Dietrich (2018).

3.3 Receptores GNSS

Os receptores GNSS permitem a utilização de alvos em campo e a coleta de suas posições para serem utilizados como pontos de apoio durante o processamento (georreferenciamento dos procedimentos fotogramétricos a partir do reconhecimento dos alvos nas fotografias aéreas). As aquisições de campo foram realizadas com a utilização de dois receptores GNSS *Spectra Precision* SP60 (Figura 2).

Estes têm 240 canais GNSS cada (GPS-NAVSTAR, GLONASS, BeiDou, Galileo), com precisão de pós-processamento (RMS) horizontal de 3 mm + 0,5 ppm, e vertical de 5mm + 0,5 ppm, nos modos estático e estático rápido, sendo leves e com interface simples (Spectra Precision, 2017).

A utilização de um par de receptores permite que um deles seja configurado como uma base local fixa, ou base de referência, enquanto o outro torna-se o receptor móvel, ou *rover*, para coleta de pontos na área de interesse. O receptor móvel pode receber as correções de posição em tempo real a partir da base local (RTK), ou, os dados podem ser pós-processados (PPK), após *download* dos dados brutos para edição, processamento de linhas de base e geração de relatórios, no *software Spectra Precision Survey Office* (SPSO).

Figura 2 – Receptor GNSS SP60: (1) painel de controle, (2) LED do *bluetooth*, (3) LED de gravação de dados, (4) LED ligado/desligado, (5) liga/configurações, (6) LED de posicionamento, (7) LED rádio UHF, (8) montagem do monopé, (9) conector de dados, (10) bateria, (11) conector USB, (12) proteção anti choque e (13) marca da altura da antena. Fonte: modificado de Spectra Precision (2016), p.7.

3.4 Pacotes de *Software*, *Hardware* e demais

O planejamento, gerenciamento e controle de voo dos RPAs foram realizados antes e durante as campanhas de campo pelo aplicativo *Map Pilot* desenvolvido pela *Drones Made Easy* (MP-DME), instalado em dispositivo móvel (*tablet*).

Durante o campo, a coleta de dados GNSS foi gerenciada por uma coletora (dispositivo móvel) da *Spectra Precision* com aplicativo próprio e para configurações de projeto. O processamento GNSS realizado em escritório foi feito no SPSO (*Spectra Precision*, 2016).

A conversão dos negativos digitais (RAW) para arquivos JPEG, quando necessária, foi realizada em pacote *open source* baseado no *software* DCRAW (*Digital Camera Raw Photo Decoder*), como o RawTherapee v.5.6.

O processamento aerofotogramétrico SfM-MVS subsequente à obtenção dos arquivos JPEG foi realizado no Agisoft Metashape Professional (ASMS), versão 1.5.1 (Agisoft, 2019a), para a geração de produtos, como as nuvens de pontos densas. Os alvos para os pontos de apoio de campo foram produzidos no mesmo *software*.

Para a manipulação e processamento das nuvens de pontos densas geradas foi utilizado o CloudCompare v.2.11 alpha (Anoia) (CloudCompare, 2019), *software open source*. De forma complementar, outros *software* foram utilizados, como o LAStools v.190507 (Isenburg, 2019) e sfm_georef (James et al., 2017b), sendo mencionados apropriadamente no decorrer do texto.

Os pacotes de *software* foram instalados em uma estação de trabalho (Intel Core i-9-9900K@3.6GHz, 64Gb memória RAM, placa de vídeo GeForce RTX 2080) do Laboratório de Análises Espaciais do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (SPAMLab, IEE-USP).

3.5 Aquisição e Obtenção de Dados 3D

Dados provenientes de imageamento LiDAR aéreo foram obtidos da Prefeitura de São Paulo (PMSP), no portal Geosampa (PMSP, 2019a). A municipalidade contratou a aquisição dos dados que foram coletados ao longo do ano de 2017 por meio de voos de helicóptero. Para a área de estudo, os voos foram realizados a uma altura aproximada de 500m, fornecendo uma nuvem de pontos densa, de múltiplos retornos, com precisão de 0,01 metro, espaçamento médio de 0,22 metro e densidade média de 21,40 pontos/m², considerando todos os retornos (Tabela 3).

Tabela 3 – Principais características dos dados LiDAR obtidos (PMSP, 2019a).

Folha	Pontos	Número de Pontos por Retorno				Densidade (pts/m ²)	Espaçamento (m)
		1	2	3	4		
2444-351	6.903.218	5.952.761	842.053	101.993	6.411	21,44	0,22
2444-352	6.052.640	5.013.317	886.009	139.302	14.012	18,96	0,23
2444-353	8.015.505	6.490.107	1.364.749	152.400	8.249	24,88	0,20
2444-354	6.553.595	5.267.029	1.099.631	171.551	15.384	20,34	0,22
2444-363	6.870.130	5.523.123	1.111.980	213.345	21.682	21,40	0,22
Média	6.879.018	5.649.267	1.060.884	155.718	13.148	21,40	0,22

Fonte: elaborado pelo autor utilizando LAStools: lasinfo.

Os dados foram distribuídos em formato LAZ (Laszip) e, para a área de estudo, divididos em cinco (05) folhas 1:1.000: 2444-351, 2444-352, 2444-353, 2444-354 e 2444-363. Todos os arquivos contam com dados de intensidade, tempo do GPS, número de retornos, classificação, entre outros (Tabela 3).

Para os dados aerofotogramétricos ocorreram aquisições nos anos de 2017 e 2019, realizadas por meio dos equipamentos e sensores anteriormente discriminados mediante planejamento prévio em escritório dos trabalhos de campo. As aquisições se iniciaram com a distribuição de alvos no terreno e coleta dos pontos de apoio pelos receptores GNSS mediante caminhamento. Em seguida, foram realizados os voos para aquisição das fotografias aéreas de acordo com inspeção das condições ambientais, planejamento de voo e *check-list* pré-voo (Figura 3).

Figura 3 – Planejamento de voo. (A) Captura de tela do aplicativo MP-DME para dispositivo móvel. (B) Conferência pré-voo do planejamento realizado. Fonte: Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera.

3.6 Processamento de Dados

Os dados LiDAR foram recebidos da PMSP pré-processados em formato LASzip (*.laz). No LAStools v.190507 e CloudCompare v.2.11 foram realizados os testes de qualidade (cálculo de densidade, espaçamento, etc.) seguido da junção das folhas em arquivo único e posterior recorte para a área de interesse. Foram realizadas filtragens para eliminação de pontos espúrios ou discrepantes (*outliers*).

Para as aquisições SfM-MVS, a primeira etapa consistiu na conversão das imagens DNG (RAW) em JPEG para facilitar a manipulação e inserção no ASMS v.1.5.1, programa que contempla um fluxo de trabalho completo de fotogrametria SfM-MVS com a geração de produtos fotogramétricos por sua interface gráfica, como nuvens de pontos densificadas, ortofotos, ortomosaicos e modelos digitais. Resumidamente, o fluxo de processamento SfM-MVS, consistiu em:

(1) Inserção das fotografias aéreas (com localização nos metadados EXIF) no ASMS. A precisão desta localização (5 a 10 metros) foi somente utilizada na etapa inicial de alinhamento, sendo melhorada posteriormente com a utilização dos GCPs.

(2) Conversão do sistema de coordenadas das imagens (coordenadas geográficas WGS 84) para as coordenadas projetadas de aquisição dos pontos de apoio (SIRGAS 2000 UTM 23 Sul).

(3) Remoção das fotografias aéreas abaixo da qualidade especificada, ou que foram tomadas em momentos fora das linhas de voo planejadas.

(4) Configuração de parâmetros iniciais para realizar alinhamento inicial e geração da nuvem de pontos esparsa. Neste processo foram realizadas quatro etapas: detecção de pontos, seleção de pares de imagens, correspondência entre os pontos e a estimativa da localização 3D das câmeras.

(5) Realização do ajustamento fotogramétrico por feixe de raios perspectivos (AFR) para aprimorar as orientações externa e interna das câmeras, modelar as distorções da lente e aprimorar a reconstrução 3D inicial (nuvem esparsa).

(6) Redução de erros presentes na nuvem esparsa para melhorar o ajustamento e a geometria do modelo: remoção de pontos associados a uma geometria pobre e a erros de correspondência entre os pontos homólogos. Procedimento realizado até que não se quebrasse o alinhamento das câmeras e antes de gerar as nuvens de pontos densas.

(7) Inserção dos pontos de apoio do terreno: fotoidentificação dos alvos dos pontos de controle e verificação. Utilizando Python, este procedimento foi realizado previamente pela geração de arquivos para o processamento automatizado.

(8) Informação de localização das imagens (baixa precisão) é desabilitada para que o referencial seja unicamente pelos pontos de controle. Os pontos de verificação medem a distância da nuvem de pontos esparsa em relação ao mundo real.

(9) Construção das nuvens de pontos densas. Podem ser gerados complementarmente malhas 3D triangulares, texturas, modelo digital de elevação (MDE), ortofotos e ortomosaico.

O ASMS permite processamento em linha de comando pela linguagem de programação Python, ou pela inserção de programas (*scripts*) para processamento avançado e automatização de procedimentos. A utilização de manuais de referência (API, *Application Programming Interface*) permitiu acessar as funções.

Os *scripts* em Python reduzem o tempo de tarefas repetitivas pela automatização de etapas de processamento das imagens e produção de relatórios específicos, resultando em maior eficiência por fluxos de trabalho que podem ser compartilhados. O fluxo de trabalho convencional ao ASMS foi aprimorado utilizando programa Python com base em USGS (2017a), USGS (2017b), James et al. (2017a, b, c) e Agisoft Community Forum (2019).

3.6.1 Automatização e padronização

A adaptação, passo-a-passo, do fluxo de trabalho para *script* em Python foi realizada para padronizar os procedimentos fotogramétricos para obtenção de nuvens de pontos com a máxima qualidade possível e com a menor variação de processamento, resultando em valores de erro de reprojeção próximos aos obtidos por filtragem manual da nuvem de pontos esparsa.

O funcionamento do *script* depende da geração de arquivos de texto contendo a informação das coordenadas 2D dos pontos de controle e verificação para cada imagem (obtidos no QGIS), altura de voo teórico e parâmetros do sensor e arquivo de calibração da câmera obtido no ASMS v.1.5.1. O *script* (Apêndice B) foi elaborado com a versão API do ASMS versão 1.5.1, disponível em: <https://www.agisoft.com/pdf/metashape_python_api_1_5_1.pdf>.

3.7 Nuvens de Pontos e Detecção de Mudanças

O ASMS v.1.5.1 permite a obtenção de diversos produtos fotogramétricos, tais como ortofotos, ortomosaicos, modelos digitais de elevação (superfície e terreno), curvas de elevação e nuvens de pontos (esparsas e densas).

As nuvens de pontos são conjuntos de dados 3D (pontos individuais com coordenadas X, Y e Z mais cor, se presente) representando objetos, ou um cenário imageado. São filtradas, ou classificadas, manualmente, ou por algoritmos especializados, para obtenção de pontos de solo (excluindo os pontos relacionados a vegetação e objetos acima da superfície do terreno) nas aplicações em geociências. As nuvens fotogramétricas são obtidas pelo imageamento de uma cena (sem penetração em vegetação, p. ex.) enquanto que as nuvens LiDAR apresentam múltiplos retornos (Figura 4), facilitando a obtenção dos pontos de solo.

Após, comparações entre duas, ou mais, nuvens de pontos, ou entre uma nuvem de pontos e uma malha triangular (superfície), podem ser realizadas, por meio de cálculos de distâncias obtidas por algoritmos (M3C2, p. ex.), possibilitando a detecção de mudanças entre as nuvens (mudança topográfica, p. ex.).

Os dados de LiDAR obtidos desempenharam papel fundamental na filtragem da vegetação das nuvens de pontos SfM-MVS, por sua penetração na vegetação e extração de retornos de solo, sendo utilizados como dados de referência para as nuvens SfM-MVS. O processamento dos dados 3D (SfM-MVS e LiDAR) foi realizado nos programas CloudCompare e LAStools.

Figura 4 – Nuvem de pontos: classificação de pontos do terreno e de objetos (e geração de modelos digitais de superfície e terreno). Os pontos fotogramétricos representam pontos de superfície (não há penetração em vegetação), incluindo objetos (vegetação e construções, p. ex.). Os pontos LiDAR permitem a obtenção de pontos do solo e dos localizados acima por sua característica.

4. MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são mecanismos da evolução das vertentes, ou encostas e, junto com o intemperismo e a erosão, são responsáveis pelo transporte de sedimentos, solos e/ou rochas ao longo da vertente, induzidos pela força gravitacional e pela ação de um ou mais fatores, como a dinâmica das águas superficiais, das águas subterrâneas, ou da ação antrópica, entre outros. São processos da dinâmica superficial terrestre resultado da interação entre hidrosfera, atmosfera e litosfera.

Os deslizamentos, ou escorregamentos, são os tipos mais comuns de movimentos de massa (Varnes, 1978; Cruden, 1991; Augusto Filho, 1992) e de maiores impactos econômicos, perdas de vidas e interferências nas atividades do homem. Assim, o entendimento dos movimentos de massa, seus mecanismos, causas e condicionantes é essencial para a prevenção de acidentes (Fernandes e Amaral, 2000).

São definidos, amplamente, como movimentos relativos ao longo da encosta, por gravidade, e para longe dela, de seus materiais formadores, tais como solo, rochas, aterros ou pela combinação entre materiais, sem necessariamente ação da água ou gelo. Quando ocorrem em presença de água, os materiais têm menor resistência ao cisalhamento e um comportamento mais plástico ou líquido, tornando os movimentos de massa mais catastróficos (Varnes, 1958; Guerra et al., 2017).

Os movimentos de massa são episódicos e compreendem deformações pré-ruptura, pela própria ruptura e pelos deslocamentos pós-ruptura. A ruptura pode ser entendida como o episódio único de movimentação mais significativo da história de um movimento de massa, envolvendo a formação de uma superfície de ruptura por deslocamento, ou por uma descontinuidade de deformação por cisalhamento, que influencia os episódios posteriores de deslocamentos pós-ruptura. A ruptura também marca uma possível mudança cinemática entre tipos diferentes de movimento de massa (Hung et al., 2014).

São os principais produtores de sedimentos e os maiores agentes de denudação do relevo, inclusive em relação ao transportado até os rios por sulcos e voçorocas (Guerra et al., 2017).

4.1 Classificação de Movimentos de Massa

Sistemas de classificação são feitos para que se possa examinar as diferenças e as similaridades entre eventos de forma sistemática. Muitas classificações foram propostas para movimentos de massa baseadas em tipologia material, tipos de movimentos, causas e outros fatores. Uma destas classificações é a de Dana, realizada em 1863, considerada uma das primeiras, porém, incompleta (Varnes, 1958; Campbell et al., 1985; Cruden, 2003). Uma parte da profusão de sistemas classificadores de 1938 até 1969 pode ser encontrada em Guidicini e Nieble (1984), incluindo o arguido dos autores a respeito dos trabalhos no período mencionado. Mencionam-se aqui ainda as classificações de Freire (1965) e de Vargas (1966), em língua portuguesa, base para a classificação proposta por Guidicini e Nieble (1984).

David J. Varnes, geólogo norte-americano, estabeleceu no ano de 1958 um trabalho pioneiro em deslizamentos para o *Highway Research Board* dos EUA (Varnes, 1958). É considerado referência na classificação de deslizamentos, junto com a revisão vinte anos mais tarde, em 1978, do próprio autor (USGS, 2002).

A classificação proposta por Varnes (1958) é baseada principalmente nos mecanismos dos deslizamentos, considerando os tipos de material e os tipos de movimento, observados pelo arranjo dos materiais.

Para Varnes (1958), o termo deslizamento denota o movimento superficial com componente gravitacional de materiais formadores de encosta como rochas, solos, aterros artificiais ou a sua combinação. Assim, os deslizamentos podem ocorrer com os seguintes três tipos de movimento: queda, deslizamento ou fluxo, ou por sua combinação. Partes de um deslizamento podem ascender enquanto outras podem sofrer abatimento. O rastejo superficial normal foi excluído por sua baixa velocidade.

Em 1968, Hutchinson propôs uma classificação para os movimentos de massa, dividida em: (a) rastejo, (b) fenômenos relacionados ao congelamento dos solos e (c) deslizamentos (em sentido amplo). Os deslizamentos abrangem aqui uma grande variedade de tipos, como translacionais, rotacionais, quedas (rochas) e subaquosos (fluxos), para solos e rochas (Hutchinson, 1968; Skempton e Hutchinson, 1969). Esta classificação tem um foco no estudo de estabilidade de encostas.

A revisão de Varnes veio em 1978 e, junto com a de Cruden e Varnes (1996), são as publicações mais utilizadas em todo o mundo para a classificação de deslizamentos (Fernandes e Amaral, 2000; Hungr et al., 2014). Uma das grandes

mudanças em 1978 é o abandono do termo deslizamento, mesmo que seja sinônimo genérico e abrangente das movimentações, pelo termo movimentos de encosta (*slope movements*), ou movimentos de massa (*mass movements*). Ocorre também a inclusão dos movimentos lentos e abrangentes, como o rastejo (*creep*), e a divisão dos principais tipos de movimento em seis: quedas, tombamentos, deslizamentos, espalhamentos, fluxos e complexos (combinações entre os demais tipos). Como no trabalho de 1958, Varnes abriga em sua classificação dois tipos de materiais principais, as rochas e os solos (Tabela 4).

Hutchinson (1988), em uma revisão do trabalho prévio, estabelece a seguinte classificação: alívio de tensões (*rebound*), rastejo, desmoronamento (*sagging*) das encostas (relacionado aos primeiros estágios dos processos de deslizamento), deslizamentos (confinados, rotacionais, compostos e translacionais), fluxos de detritos, tombamentos, quedas e movimentos de encosta complexos.

Tanto a classificação de Varnes (1978) como a de Hutchinson (1988) foram estabelecidas utilizando os tipos principais de movimento das instabilizações, com a maior diferença na classificação de fluxos de massa (Cruden e Varnes, 1996).

Tabela 4 – Sumário simplificado da classificação de Varnes (1978) para movimentos de massa (traduzido de Varnes, 1978, p. 1).

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Substrato rochoso	Solos (engenharia)	
				grossos	finos
Quedas (<i>falls</i>)			de rochas	de detritos	de solos
Tombamentos (<i>topples</i>)			de rochas	de detritos	de solos
Deslizamentos (<i>slides</i>)	Rotacional ou circular	poucas unidades	deslizamento de rochas	deslizamento de detritos	deslizamento de solos
	Translacional ou planar (<i>translational</i>)		de blocos rochosos	de blocos detritos	de blocos de solo
		-----	de rochas		
Espalhamentos laterais (<i>lateral spreading</i>)			de rochas	de detritos	de solo
Fluxos (<i>flows</i>)			de rochas (<i>deep creep</i>)	de detritos (<i>soil creep</i>)	de solo
Complexos (<i>complex</i>)			Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

Fonte: Varnes (1978).

Os mecanismos e velocidade são associados, podendo variar em intervalos que se sobrepõem, ou através de mudanças rápidas de velocidade. Velocidades médias a baixas indicam equilíbrio entre as forças de gravidade (que forçam a massa encosta abaixo) e de atrito (que resiste à gravidade), enquanto as velocidades mais altas refletem o desequilíbrio, onde aceleração e desaceleração rápidas podem ocorrer (apesar da gravidade ser constante) provocadas, por exemplo, por saturação de uma encosta e pela mudança de estado dos materiais (Campbell et al., 1985).

Varnes (1978) propõem uma escala de velocidades em que os processos ocorrem, variando entre extremamente lento, onde movimentações ocorrem com velocidades menores a 5 anos, a extremamente rápido, com velocidades superiores a 3 m/s, posteriormente modificada por Cruden e Varnes (1996) (Tabela 5).

Cruden e Varnes (1996) retomam o termo deslizamento, inclusive no título de seu trabalho, no sentido de Cruden (1991), que definiu o termo deslizamento (do inglês, *landslide*) como o movimento de uma massa, seja ela composta de rocha, detrito ou solo, ao longo de uma vertente, por gravidade, que não se limita somente aos processos aéreos (ocorrem deslizamentos subaquosos), nem à física dos materiais ao deslizar por uma superfície. O tipo complexo dos movimentos de massa sai da classificação formal, sendo o termo utilizado para um estilo de atividade.

Outros aspectos importantes da classificação de Cruden e Varnes (1996) são a caracterização da atividade dos deslizamentos (ativos, reativados, suspensos, inativos ou dormentes), sua distribuição (retrogressivos, em avanço, em alargamento, em ampliação ou diminuição e confinados) e seu estilo (complexos, compostos, múltiplos, sucessivos ou únicos), da velocidade (não modificado da classificação anterior), da presença ou ausência de água, dos tipos de materiais (rocha e solos), e dos movimentos (queda, tombamento, deslizamento, espalhamento e fluxo).

Tabela 5 – Classe de velocidade de processos de movimento de massa (modificado de Hungr et al., 2014, em tradução livre do autor).

Descrição	Velocidade típica	Classe
Extremamente rápido	5 m/s ou maior	7
Muito rápido	3 m/min	6
Rápido	1,8 m/h	5
Moderado	13 m/mês	4
Lento	1,6 m/ano	3
Muito lento	16 mm/ano	2
Extremamente lento	menor que 16 mm/ano	1

Fonte: Hungr et al. (2014).

Posteriormente, Hungr et al. (2014) revisaram a classificação de Varnes (1978) e Cruden e Varnes (1996), de forma a incorporar os avanços do conhecimento sobre os deslizamentos, seus materiais e mecanismos.

Hungr et al. (2014) entendem que os materiais propostos por Varnes (1978) e Cruden e Varnes (1996) não são compatíveis com termos geológicos ou geotécnicos. Assim, propuseram a utilização de terminologia geotécnica e geológica para os materiais como rocha, argila, lama, silte, areia, cascalho, blocos, detritos e turfa; e complementado pela gênese geológica, se relevante na determinação do mecanismo do movimento de massa, tais como, intrusivo, vulcânico, metamórfico, entre outros para as rochas; e residual, coluvionar, aluvionar, orgânicos, aterros genéricos, aterros de engenharia, barragens de rejeito de mineração e aterros sanitários para os solos.

No Brasil, Fernandes e Amaral, (2000) destacam algumas classificações brasileiras, como as de Freire (1965), Guidicini e Nieble (1984) e Cunha (1991). Este último, base da classificação utilizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP). Posterior a estas, Augusto Filho (1992) apresentou uma classificação, em quatro grandes grupos de movimentos de massa, considerada referência no Brasil (Tabela 6).

Tabela 6 – Comparação entre algumas das propostas brasileiras de classificação dos movimentos de massa (modificado de Fernandes e Amaral, 2000 e Augusto Filho, 1992).

Freire (1965)	Guidicini e Nieble (1984)	Cunha (1991)	Augusto Filho (1992)
Escoamentos: rastejos e corridas	Escoamentos: rastejos e corridas	Rastejos	Rastejos
		Corridas de massa	Corridas
Escorregamentos: rotacionais e translacionais	Escorregamentos: rotacionais, translacionais, quedas de blocos e queda de detritos	Escorregamentos	Escorregamentos: Planares, circulares e em cunha
Subsidências: subsidência, recalques e desabamentos	Subsidências: subsidências, recalques e desabamentos	Quedas e tombamentos	Quedas: quedas, rolamentos de matação, tombamentos
	Formas de transição ou Termos de Passagem: transição entre anteriores Movimentos de massa complexos: combinação dos anteriores		

Fonte: Cunha (1991), Augusto Filho (1992), Fernandes e Amaral (2000).

Infanti Júnior e Fornasari Filho (1998) e Fornasari Filho e Faria (2018) destacam a classificação de Augusto Filho (1992), a mais utilizada no Brasil e baseada nos principais tipos de instabilizações ocorrentes no país, relativos a ambientes tropicais, considerando como uma das referências para classificação dos movimentos de massa no país (em detalhes na Tabela 7 e Figura 5), adotando um terceiro tipo de deslizamento (em cunha).

Tabela 7 – Principais tipos de movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo (<i>creep</i>)	Vários planos de deslocamentos (internos) Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada, geometria indefinida
Escorregamentos (<i>slides</i>)	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Tipo planar: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Tipo circular: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Tipo cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>falls</i>)	Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento
Corridas (<i>flows</i>)	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992), Augusto Filho (1995).

Figura 5 – Desenhos esquemáticos dos tipos principais de movimentos de massa. (A) Rastejo (*creep*); (B) deslizamentos: (B1) planar, (B2) rotacional e (B3) em cunha; (C) movimentos com blocos rochosos: (C1) quedas (*falls*), (C2) tombamentos (*topple*), (C3) rolamentos e (C4) deslocamentos; (D) fluxo (*flow*). Fonte: U.S. Geological Survey (2004), a partir das figuras ilustrativas de Varnes (1978); Reis (2001).

4.1.1 Rastejos

Estes movimentos de massa se caracterizam por baixa velocidade (0,5 a 10mm / ano) das camadas superficiais de solo (tipicamente menos de 1m de profundidade), podendo ser contínuos, progressivos, ou ativados sazonalmente (Figura 6) (Carvalho et al., 2007; Highland e Bobrowski. 2008). Inicialmente, na classificação de Varnes (1958) e na revisão feita por Fernandes e Amaral (2000), estes processos foram excluídos por entendimento destes autores que sua baixa velocidade acarretaria em baixa importância econômica.

Highland e Bobrowski (2008) entendem que o rastejo (*creep*) é uma denominação informal ao fluxo lento de solos, causado por uma tensão de cisalhamento que não é suficiente para formar superfícies de ruptura definidas, porém, submetidos a uma tensão de fluência, menor que a de cisalhamento. Assim, são classificados por Guidicini e Nieble (1984) como escoamentos, em sentido amplo, e considerados deformações lentas, por gravidade, em rochas e solos, ou sua mistura, com influência das variações de temperatura promovendo expansão e contração do material, com movimento consequente, em espessura proporcional a esta variação e geralmente associada às porções mais rasas do material (*seasonal*, ou *mantle creep*).

O rastejo em profundidade maior, em relação ao atingido por variações de temperatura, ocorre unicamente por ação da gravidade, caracterizado como um rastejo constante, ou constante (*continuous*, ou *mass creep*), em detrimento do rastejo cíclico ou sazonal das camadas superiores.

Carvalho et al. (1991) indicam que depósitos de tálus apresentam estes processos com velocidade significativa, podendo ser aumentada por ação antrópica, por meio de cortes, ou escavações, nas porções baixas dos depósitos.

Além das variações de temperatura, os solos rasos estão sujeitos a variações cíclicas de volume devido às mudanças de umidade, ação de animais e da vegetação, que contribui para o transporte por gravidade. Em períodos longos de tempo as encostas íngremes acabam recobertas por um manto coluvionar, que é uma das fontes de deslizamentos rasos, como os deslizamentos planares (Hung et al., 2014).

A própria evolução do rastejo, por condições de umidade, ou de mudança de inclinação do terreno pode resultar em uma evolução para um processo mais rápido e com superfície de ruptura definida, de forma que os rastejos podem ser indicadores de processos mais rápidos. Os rastejos podem causar danos significativos, como em obras civis e fundações de obras de arte (Fornasari Filho e Faria, 2018).

Figura 6 – Encosta, em primeiro plano, com sinais do processo de rastejo (terraces), possivelmente acelerado pela remoção da cobertura vegetal e uso para pastagem. Próximo ao Pico do Jaraguá. Fonte: fotografia tirada pelo autor na Rua da Cascata, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP.

4.1.2 Deslizamentos ou escorregamentos

Os deslizamentos, ou escorregamentos, geralmente compreendem outros termos não técnicos amplamente difundidos na sociedade brasileira, tais como quedas de barreira e desbarrancamentos. O sentido da palavra deve ser entendido como na classificação de Varnes (1958; 1978) e de Cruden (1991), em um sentido estrito apenas, em detrimento do sentido amplo de abranger todos os movimentos de massa, incluindo os próprios deslizamentos, como comumente divulgado nos meios não técnicos.

Em geral, são movimentos rápidos, de curta duração, de partes de taludes naturais, taludes de corte ou aterro, tendo superfície de ruptura e volume bem definidos em que a água é o principal agente deflagrador e, portanto, são observados com maior frequência durante os períodos chuvosos. O deslizamento ocorre quando a relação entre a resistência do material e as tensões cortantes tem valor de 1 na superfície de ruptura (Guidicini e Nieble, 1984; Carvalho et al., 1991).

Os deslizamentos são divididos de acordo com a forma de sua superfície ou plano de ruptura, onde ocorre deformação por cisalhamento, e ao material envolvido em (a) rotacionais ou circulares, (b) translacionais ou planares (Varnes, 1978). Uma terceira divisão é comumente adotada no Brasil, denominada de (c) deslizamentos em cunha, ou estruturados, seguindo os trabalhos de Guidicini e Nieble (1984) e Augusto Filho (1992). Para todos estes tipos, o material deslizado pode compor-se de solos, rochas, detritos e a mistura entre eles.

4.1.2.1 Planares ou translacionais

São os mais frequentes entre os diferentes tipos de movimentos de massa (Figura 7), típicos de regiões montanhosas como a Serra do Mar. A superfície de ruptura é relativamente planar, com movimento translacional, por refletir planos de fraqueza e descontinuidades mecânicas ou hidrológicas, tais como, falhas, juntas, foliações, estratificações, estruturas reliquias, contatos solo-rocha, solo-solo, entre outras presentes em maciços terrosos e rochosos (Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowski, 2008).

Figura 7 – Cicatriz de deslizamento translacional, condicionado por ação antrópica de desmatamento, cortes e aterros, induzindo a concentração de água em superfície, no topo da cicatriz. Localizada na vertente norte-nordeste de alta declividade da Serra do Morro Doce. Fonte: fotografia tirada pelo autor no Bairro Itaberaba II, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP.

São, em geral, rasos em profundidade, podendo haver pequeno movimento rotacional, ou inclinação, da parte superior, com comprimento superior à largura. O movimento progride até distâncias consideráveis quando a superfície é suficientemente inclinada, envolvendo solos, rochas ou a mistura dos dois, com velocidades lentas a extremamente rápidas. Durante o deslocamento, caso exista uma barreira ao movimento, geralmente, ocorre a extrusão do sopé formando embarrigamento do sopé do deslizamento. Em altas velocidades e com alto teor de água o material em deslocamento pode perder a coesão interna pela saturação ou desagregação, evoluindo para um movimento por fluxo, com grande poder de destruição (Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowski, 2008).

Os corpos de tálus têm como característica a precária estabilidade, especialmente se modificados e saturados, e podem movimentar-se ao longo dos planos aos quais estão depositados como deslizamentos planares por sua velocidade maior em relação aos rastejos (Guidicini e Nieble, 1984, p. 36/37).

Ocorrem frequentemente durante períodos de chuvas intensas ou prolongadas, em que a dinâmica hidrológica é mais superficial, com a ruptura provocada pelo aumento das poro pressões positivas. Assim, a morfologia das encostas e as propriedades hidráulicas dos materiais é importante condicionante na geração deste tipo de deslizamento (Fernandes e Amaral, 2000).

4.1.2.2 Circulares ou rotacionais

Os deslizamentos circulares, ou rotacionais, têm, em geral, a superfície de ruptura curva (circular), de forma côncava para cima, onde o material tem movimento rotacional em torno de um eixo paralelo à encosta. O topo deslocado tende a mover-se verticalmente para baixo, com inclinação em direção à encosta. Geralmente são formados em solos homogêneos e espessos, sendo comuns em aterros e em mantos de alteração espessos. Originam-se, muitas vezes, de cortes nos sopés das encostas, envolvendo maiores profundidades em movimentação e por saturação. Estes movimentos têm velocidades entre extremamente lenta a rápida (Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowski, 2008).

No sudeste do Brasil são considerados comuns, porém, não apresentando todas as feições características deste tipo de movimento. Quando associados à água de chuvas, os movimentos deste tipo refletem percolações mais profundas e lentas (Fernandes e Amaral, 2000).

4.1.2.3 Em cunha ou estruturados

Os deslizamentos em cunha são condicionados por dois ou mais sistemas de descontinuidades, formando planos de fraqueza que se interceptam de forma desfavorável à estabilidade, em maciços rochosos ou saprolitos (maciço rochoso muito a extremamente alterado com descontinuidades provenientes de estruturas reliquias, heterogeneidade entre tipos de solos, etc.) e em solos saprolíticos, que guardam estruturas reliquias.

Os deslocamentos de massa ocorrem ao longo dos eixos de intersecção dos planos sendo comuns em taludes de corte, ou em encostas que sofreram desconfinamento por erosão, ou deslizamentos (ação antrópica). Quando um único padrão estrutural é presente desenvolvem-se deslizamentos planares (Carvalho e Galvão, 2006; Carvalho et al., 2007; Fornasari Filho e Faria, 2018).

4.1.3 Quedas, Tombamentos e Rolamentos de Blocos

As quedas são movimentos rápidos (Figura 8-A), sem superfície de ruptura definida, ocorrendo queda livre de blocos, lascas de rocha ou matacões, assim como de solo ou ambos, por gravidade. Estes processos estão relacionados, geralmente, a encostas rochosas de declividade alta, ou em taludes de corte em rocha alterada, ou são. A massa deslocada atinge encosta abaixo onde a declividade, em geral, é menor, o que pode originar saltos, fragmentação do material, e o início de deslizamento ou rolamento, caso a encosta ainda seja muito íngreme, com sua mobilização até cotas inferiores do terreno (Carvalho et al., 1991; Highland e Bobrowski, 2008).

Figura 8 – Movimentos de blocos: (A) queda em talude de corte para estrada em José Boiteux, SC em rochas sedimentares. (B) Tombamento em talude de corte rodovia em Amparo, SP. Fonte: fotografias tiradas pelo autor.

Estão associadas geralmente a paredões rochosos íngremes e à formação de depósitos de tálus, em encostas naturais. São associados a taludes de corte de estradas, rodovias, edificação de estruturas e atividades de mineração. A origem do movimento é pela presença de estruturas geológicas e descontinuidades no maciço rochoso, desfavoráveis à estabilidade, e pelos processos de intemperismo, como a erosão diferencial em rochas sedimentares (Carvalho et al., 1991).

Os tombamentos, também conhecidos como basculamentos, (Figura 8-B) têm velocidades que variam entre extremamente lento a extremamente rápidos, podendo ocorrer aceleração durante a movimentação de materiais rochosos, ou incluindo terrosos, por rotação de sua parte frontal em torno de um eixo abaixo de seu centro de gravidade, provocados principalmente por cortes e desconfinamento (Carvalho et al., 2007; Highland e Bobrowski, 2008).

Os processos de rolamento de blocos são comuns em áreas de formação de blocos isolados ou dos campos de matacões, associados a ocorrência de rochas graníticas e à sua intemperização e evolução da paisagem. Os rolamentos ocorrem naturalmente quando pequenos deslizamentos removem o solo de apoio da base dos blocos e, em cortes, quando os matacões estão imersos em matriz de solo, movimentando-se por conta de deslizamentos ou erosão, descalçando a base dos blocos (Carvalho et al., 1991; Carvalho et al., 2007).

Desplacamentos constituem o último tipo de movimentos de blocos rochosos em que ocorre o deslizamento, ou a queda livre, de lascas, ou placas, de rocha formadas por estruturas do maciço rochoso, por variações térmicas, ou alívio de tensões do maciço (Fornasari Filho e Faria, 2018).

4.1.4 Fluxos ou Corridas

São movimentos rápidos a extremamente rápidos onde os materiais mobilizados têm comportamento de fluído viscoso, ocorrendo um processo de fluxo contínuo de material constituído por solos, detritos, rochas e material orgânico (Figura 9). Geralmente, são associados a concentração excessiva de água, devido a chuvas intensas, nos canais de drenagem cujas dimensões limitam o fluxo e o direcionam, podendo progredir por quilômetros nos terrenos de maior declividade. O material fonte pode ser proveniente de deslizamentos, ou outros tipos de movimentos de massa, dependendo da quantidade de água e velocidade, que evoluem para fluxos ao atingir os canais de drenagem. (Fernandes e Amaral, 2000; Highland e Bobrowski, 2008).

Figura 9 – Parte superior da bacia do rio Guarda-Mão, ao fundo, com deslizamentos de solo e rocha e, em primeiro plano, área de deposição do fluxo ocorrido em 2010, Itaóca, SP. Fonte: Gramani (2015).

4.2 Nomenclatura dos deslizamentos

Em 1990 a Associação Internacional de Geologia de Engenharia (*International Association of Engineering Geology*, IAEG) por meio de sua Comissão sobre Deslizamentos e outros Movimentos de Massa e outras entidades geotécnicas formaram o *Working Party – World Landslides Inventory* da UNESCO (WP-WLI) para sugerir uma nomenclatura para as feições identificáveis dos deslizamentos e de suas dimensões (geometria), baseada em Varnes (1978), apresentadas posteriormente em Cruden e Varnes (1996), para consolidar e padronizar a terminologia na forma do Glossário Multilíngue dos Deslizamentos (WP-WLI, 1993). Posteriormente, em 2008, foi traduzida para o Português (Figura 10) na publicação de Highland e Bobrowski (2008).

4.3 Fatores Causadores

Os fatores causadores dos movimentos de massa gravitacionais podem ser únicos, ou pela combinação entre eles, e determinam a localização espacial de ocorrência dos processos. Para Varnes (1978) os fatores causadores dos movimentos dividem-se nos que (a) aumentam as solicitações das encostas e taludes e (b) nos

que diminuem a resistência do material que constitui as encostas e taludes (Tabela 8). Importante notar que apenas um fenômeno, como a elevação do nível d'água, pode ser responsável por aumento de solicitações e pela redução de resistência de um maciço (Varnes, 1978; Augusto Filho, 1995; Guerra et al., 2017).

Figura 10 – Figura de deslizamento rotacional com as nomenclaturas usuais a partir do estabelecido internacionalmente. Fonte: modificado de Varnes (1978) e Highland e Bobrowski (2008).

Tabela 8 – Fatores deflagradores dos movimentos de massa para Varnes (1978).

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos/Antrópicos
Aumento da solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão, deslizamentos Cortes Peso de água da chuva, granizo, etc.
	Sobrecarga	Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas, congelamento, material expansivo
Redução da resistência	Características inerentes do material (geometria, estruturas, etc.)	Características geomecânicas do material, tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito Elevação do nível d'água

Fonte: Varnes (1978), Augusto Filho (1995).

Para Guidicini e Nieble (1984) os fatores são divididos em agentes e causas (Tabela 9), sendo que as causas são o modo de atuação de um determinado agente no equilíbrio entre a resistência do material e as forças mobilizadoras. Os agentes predisponentes são as características naturais dos terrenos, condicionantes, e os agentes efetivos são os deflagradores dos movimentos (Augusto Filho, 1995).

Podem ainda ser divididos em fatores condicionantes, de origem associada a processos geológicos, geomorfológicos e climatológicos e em processos de gatilho ou deflagradores.

Tabela 9 – Agentes e causas dos movimentos de massa para Guidicini e Nieble (1984).

Agentes e Causas dos Movimentos de Massa			
Agentes	Predisponentes	Complexo geológico, complexo morfológico, complexo climático-hidrológico, gravidade, calor solar, tipo de vegetação original	
	Efetivos	Preparatórios	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação de nível de lagos e marés e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive desflorestamento
		Imediatos	Chuvas intensas, fusão do gelo e neve, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem, etc.
		Internas	Efeito das oscilações térmicas Redução dos parâmetros de resistência por intemperismo Mudanças na geometria do sistema
Causas	Externas	Efeitos de vibrações Mudanças naturais na inclinação de camadas Elevação do nível piezométrico em massas "homogêneas" Elevação da coluna da água em descontinuidades	
		Intermediárias	
		Rebaixamento rápido do lençol freático Erosão subterrânea retrogressiva (<i>piping</i>) Diminuição do efeito de coesão aparente	

Fonte: Guidicini e Nieble (1984), Augusto Filho (1995).

Apesar de dependente de diversos fatores, a ação conjunta dos deflagradores ambientais e ações humanas quase sempre aceleram os movimentos de massa. A falta de planejamento urbano, ou da instalação de infraestrutura mínima, nas ocupações, muitas vezes vulneráveis e instaladas em terrenos inadequados, de alta suscetibilidade a processos adversos, com manejo inadequado dos solos, são apontados como os principais causadores (Guerra et al., 2017).

4.3.1 Condicionantes ambientais

As condições pré-existent, agentes predisponentes, são os condicionantes geológicos, geotécnicos, geomorfológicos e climatológicos para os movimentos de massa. São as condições que se iniciam com um longo processo desde a formação das rochas, onde suas propriedades físicas são definidas, e pelos eventos seguintes como movimentos crustais, erosão e intemperismo, partes da evolução e desenvolvimento da paisagem e de suas formas (Guidicini e Nieble, 1984; Schuster e Wieczorek, 2002). Síntese dos principais condicionantes de movimentos de massa na instabilização de encostas e taludes na dinâmica ambiental brasileira pode ser vista na Tabela 10.

Os materiais constituintes das encostas e taludes podem ser naturalmente pouco resistentes, ou tornarem-se pouco resistentes por processos intempéricos. Ainda podem apresentar descontinuidades como falhas, fraturas, juntas, foliação, zonas de cisalhamento, entre outras (Cruden e Varnes, 1996).

As descontinuidades atuam como caminhos preferenciais para alteração e intemperismo, especialmente através da água, tanto nos maciços rochosos quanto os constituídos por solos, que condicionam fortemente os movimentos como as quedas de blocos e os deslizamentos em cunha, por exemplo.

A morfologia das encostas também podem condicionar os movimentos de massa, substanciada pela relação direta entre a frequência de eventos e a declividade da encosta, provocada pela diminuição do fator de segurança no aumento do ângulo de inclinação.

Cuidados devem ser tomados com esta relação, pois, não necessariamente ocorre o aumento do número de movimentos em unidades de relevo com maior declividade, uma vez que que nelas o solo já pode ter sido removido anteriormente (Fernandes e Amaral, 2000).

Tabela 10 – Principais condicionantes de movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.

Climáticos, com destaque para o regime pluviométrico
Materiais que compõem o substrato das encostas e taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistossidade, fraturas, etc.), suas características e distribuição espacial
Geomorfológicos, com destaque para a inclinação, amplitude e forma do perfil dos taludes e das encostas (retilíneo, côncavo e convexo)
Regime das águas de superfície e subsuperfície
Características do uso e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópicas das encostas, como cortes, aterros, concentração água pluvial e servida, etc.

Fonte: Augusto Filho et al. (2018)

As encostas ainda podem convergir, ou divergir, as linhas de fluxo d'água, onde as de forma côncava concentram água e sedimentos, tornando-se mais suscetíveis a movimentos de massa.

Os depósitos de encosta, formados por tálus e coluviões, são associados a áreas de encosta com convergência de fluxos. Estes materiais são heterogêneos, resultantes do processo de formação dos depósitos, e quando associados ao local de ocorrência, podem tornar-se instáveis e suscetíveis aos movimentos de massa por terem descontinuidades em seu interior.

4.3.2 Processos deflagradores

Os movimentos de massa podem ser causados por um ou muitos fatores, ou ainda por agentes efetivos preparatórios, sejam eles geológicos, geomorfológicos, climáticos, ou pelas atividades humanas, mas, geralmente, têm apenas um processo deflagrador, ou gatilho (*trigger*). Em Guidicini e Nieble (1984) tratam-se dos agentes efetivos imediatos. O termo deflagrar se refere a um estímulo externo, como uma chuva intensa que provoca uma reação imediata, ou quase imediata, na forma de um deslizamento por aumentar rapidamente as tensões de cisalhamento, por desconfinamento lateral ou por reduzir a resistência dos materiais (Varnes, 1978; Cruden e Varnes, 1996; Schuster e Wieczorek, 2002).

Não fizeram parte desta revisão os deflagrados por atividade sísmica, por corpos d'água próximos a encostas, por erupções vulcânicas, por erosão costeira, e por ruptura de barramentos naturais e artificiais.

4.3.2.1 Precipitação

A maior parte dos movimentos de massa é deflagrada pela precipitação de chuvas, sejam elas intensas de período curto, ou aquelas de intensidade moderada que duram vários dias. A água de chuva em maciços rochosos penetra nas juntas e fraturas, produzindo pressões hidrostáticas responsáveis pelas instabilizações, e nos maciços terrosos (solos) ocorre o aumento das poro-pressões, com diminuição da resistência ao cisalhamento e consequente instabilização. É o principal deflagrador de diferentes tipos de movimentos de massa em diferentes países das Américas, da Europa e da Ásia, incluindo Brasil.

A água é um dos principais agentes preparatórios, de aceleração e de deflagração dos movimentos de massa, por aumentar a solicitação em encostas e por

ser um importante agente do intemperismo físico e químico. Além disso, o aumento de água em uma encosta, por infiltração, aumenta as poro-pressões na subida do nível freático, ou pela mudança de saturação do solo, o que diminui a resistência ao cisalhamento. Em termos de deflagração de movimentos em relação à pluviosidade, os índices de chuvas para movimentos de massa induzidos são menores do que aqueles naturais (Augusto Filho, 1995).

Um histórico breve dos movimentos de massa deflagrados por chuvas intensas nestas localidades é apresentado em Schuster e Wieczorek (2002), incluindo a tragédia em 1966 na região metropolitana do Rio de Janeiro, em 1967 na região entre São Paulo e Rio de Janeiro (Serra das Araras e em Caraguatatuba), seguido da de 1988 em Petrópolis e Rio de Janeiro, e em 2001 na região serrana do Rio de Janeiro. Além destes, de grande magnitude, podem ser relacionados a chuvas intensas os desastres de 2010 em São Luís do Paraitinga-SP, de 2011 no Rio de Janeiro (Figura 11), de 2012 em Itaóca-SP, de 2013 no Espírito Santo e de 2016 na capital paulista.

As chuvas podem provocar diferentes tipos de movimentos de massa. Quando rápidas e intensas têm a tendência de gerar rupturas rasas, como deslizamentos rasos evoluindo para fluxos de massa. As chuvas contínuas, ou chuvas intensas precedidas de chuvas contínuas, tendem a gerar movimentos mais profundos, tanto em solos como em rochas, geralmente com um retardo pela demora na elevação no nível d'água e das poro-pressões (Schuster e Wieczorek, 2002).

A precipitação é relacionada diretamente com a dinâmica das águas superficiais e subsuperficiais das encostas. Assim os limiares de chuva para a deflagração de movimentos de massa, especialmente os de alta velocidade, são fundamentais na previsão e nos sistemas de alerta de eventos. Estes limiares variam de região para região, de acordo com a geologia local, geomorfologia e condições climáticas. A saturação dos solos por chuvas de grande intensidade, especialmente dos solos rasos, provocando o aumento das poro-pressões, é tida como a causa mais comum dos deslizamentos rasos.

Incêndios podem produzir uma camada hidrofóbica no solo, em profundidade, que em conjunto com a perda da cobertura vegetal, provoca a perda de coesão superficial do solo e consequente aumento de fluxo superficial, e geração de erosões em sulco do material superficial desagregado. Em condições de chuvas intensas este material é lavado das encostas e se acumula nas drenagens, podendo gerar fluxos de detritos, por exemplo (Schuster e Wieczorek, 2002).

Figura 11 – Deslizamentos ocorridos em 2011, na Região Serrana do Rio de Janeiro, após chuvas intensas. Fonte: modificado de Fernandes (2013).

4.3.2.2 Erosão

A erosão, assim como os movimentos de massa, são processos de modificação da paisagem. Ela também é associada a força de gravidade, à presença ou ausência de água e cobertura vegetal, intensidade e volume de chuvas, declividade e propriedades do solo (Guerra et al., 2017).

Para Schuster e Wieczorek (2002), a erosão fluvial decorrente da dinâmica fluvial, que depende da profundidade do canal, da erodibilidade dos materiais expostos e da velocidade do fluxo d'água, pode deflagrar movimentos de massa nas encostas adjacentes. Desta maneira a erosão promove a inclinação excessiva das margens do curso d'água, reduzindo sua estabilidade e resistência ao cisalhamento, gerando movimentos de massa gravitacionais, tais como, deslizamentos planares ou rotacionais, de solos ou rochas.

Cruden e Varnes (1996) identificam a erosão do sopé das encostas por choque de ondas ou erosão fluvial, das margens laterais de cursos d'água e da erosão subterrânea por dissolução e *piping*, como processos que aumentam a tensão de cisalhamento por removerem material de sustentação das encostas ou margens.

Estes movimentos de massa são intimamente ligados à dinâmica fluvial, onde as instabilizações ocorrem geralmente na parte externa dos meandros dos rios, por erosão fluvial que promove o recuo da margem, enquanto a parte interna da curva recebe os sedimentos carreados pelo curso d'água. Por este motivo, no Brasil, este processo é comumente vinculado mais à dinâmica dos rios do que das encostas, com a denominação de solapamento de margem, quando ocorre a instabilização das margens por erosão fluvial, associado ao processo das cheias e inundações. Este

pode acarretar em fatalidades e perdas, em caso de ocupações ribeirinhas vulneráveis sobre as margens, que colapsam ou deslizam. Pela dinâmica fluvial, a evolução é rápida quando comparada a outros processos morfodinâmicos.

Carvalho et al. (1991) mencionam que rupturas de pequeno porte, remontantes, podem ser resultado da evolução de erosões, em sulcos ou diferenciais, em taludes de corte, alterando forma e geometria, com a formação de paredes de inclinação excessiva e instáveis em relação à resistência dos solos. Este entendimento pode ser estendido para o cenário de encostas naturais com a presença de erosões induzidas ou não, como ravinas e voçorocas, cuja evolução é remontante por deslizamento das paredes deflagrado por infiltração de águas de chuva, podendo ser intensificado por lançamento de águas urbanas. Guidicini e Nieble (1984) entendem que as voçorocas são movimentos de massa complexos por mesclarem diferentes processos.

4.3.2.3 Ação antrópica

O homem é o agente modificador mais importante na dinâmica das encostas (Tabela 11), por conta do uso e ocupação do solo em regiões naturalmente suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, intensificando os processos de instabilização (Augusto Filho, 1995). A perda de suporte de sustentação, com consequente movimentação nas vertentes, pode ocorrer com a execução de taludes de corte no sopé (Figura 12) ou no meio das encostas, em cavas de mineração e pelo rebaixamento de reservatórios. Nos cortes podem ocorrer sem a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, porém, são agravadas por sua presença.

Em taludes cortados o estado de tensões no maciço é modificado, com tendência à instabilização da porção a montante, com aparecimento de trincas provocadas por tensões de tração. As trincas podem ser preenchidas por água proveniente de chuvas provocando instabilização e deslizamentos nos cortes. Os cortes promovem alteração das condições de drenagem e supressão de vegetação que provocam maior infiltração e saturação do maciço, reduzindo sua resistência e a geração de processos erosivos (Carvalho et al., 1991), induzindo os deslizamentos.

A execução sem técnicas adequadas, ou em regiões sem aptidão, de aterros de solo, detritos ou sanitários, pode aumentar a sobrecarga no terreno, com o aumento da altura e da extensão da encosta, inclusive da declividade. Outras formas são a edificação de estruturas, vazamentos de água, irrigação, reservatórios, tanques, sistemas de esgoto e fossas sépticas (Figura 13-A) (Cruden e Varnes, 1996).

Tabela 11 – Alterações antrópicas em ambiente urbano causadoras de instabilidade (Cerri, 1992).

Alterações	Objetivos / Consequências
Execução de cortes com alturas e inclinações acima de limites tecnicamente seguros	Os terrenos são adaptados ao padrão mais convencional e econômico de construção de moradias
Execução de patamares (aterros) com o próprio material de escavação dos cortes que é simplesmente lançado por sobre o terreno natural	
Instalação das moradias muito próximas à base ou ao topo dos taludes naturais ou de corte	Maior aproveitamento dos terrenos
Excessiva retirada da cobertura vegetal	Eliminando-se sua contribuição à estabilidade
Cultivo de espécies que favorecem a instabilidade das encostas (bananeiras)	Utilizadas como produtoras de alimento e para demarcar "lotes"
Lançamento em superfície, das águas servidas; concentração de águas pluviais	Possibilitando uma contínua infiltração de água nos maciços
Instalação de fossas	
Lançamento e concentração de lixo e entulho nas encostas	Produzindo materiais altamente instáveis

Fonte: Cerri (1992)

O aumento transitório do estado de tensões de um talude ou encosta pode ocorrer por tremores, como atividades de mineração (operações de detonação para desmonte de rochas), ou pela passagem de veículos pesados. Sismos naturais ou induzidos também provocam a mudança do estado de tensões dos maciços e podem provocar ou induzir instabilizações (Cruden e Varnes, 1996).

Figura 12 – Deslizamento planar raso deflagrado por chuvas intensas de 2009 em talude de corte, sem contenção, em ocupação precária na vertente norte-noroeste do Morro Doce. Fonte: fotografia tirada pelo autor, no Distrito Anhanguera, Bairro Itaberaba II, São Paulo, SP.

A remoção da cobertura vegetal, seja por incêndios ou por desmatamento, expõe os solos superficiais, estando mais expostos aos processos intempéricos, erosivos e dos movimentos de massa. Além disso, a remoção da cobertura vegetal diminui a resistência aos movimentos de massa (Figura 13-B) pela modificação do regime de escoamento superficial (incremento), e por remover o efeito fixador dos solos superficiais causado pelas raízes da vegetação então instalada.

A ação antrópica é resultante, em geral, da falta de planejamento de uso e ocupação do solo, do crescimento não planejado das cidades, agravando os processos naturais de erosão e dos movimentos de massa, os quais impactam diretamente estas ocupações.

Figura 13 – Ação antrópica: (A) deslizamento planar raso deflagrado por chuvas intensas de 2009 e ruptura de fossa séptica em ocupação na vertente N-NW do Morro Doce. Fonte: fotografia tirada pelo autor, no Bairro Itaberaba II. (B) Contraste na distribuição de movimentos de massa entre encostas vegetadas e pastos desflorestados na Nova Zelândia. Fonte: Crozier (2010), p.266.

4.4 Estabilidade de Encostas e Taludes

Os movimentos de massa em encostas ou taludes, como os deslizamentos, são deflagrados quando as tensões cisalhantes mobilizadoras se igualam à resistência ao cisalhamento (Figura 14), condição atingida pela redução da resistência dos solos, ou pelo aumento das tensões mobilizadas, formando uma superfície de cisalhamento contínua no material, resultado do deslizamento relativo de um conjunto de partículas, onde o entorno da superfície de ruptura perde suas características (Carvalho et al., 1991; Gerscovich, 2009).

A estabilidade de uma encosta terrosa é dependente da resultante entre as forças de resistência e das forças mobilizadoras, que promovem os movimentos de massa encosta abaixo (p. ex., força da gravidade). A força de resistência é dada pela

resistência ao cisalhamento, função da resistência entre partículas do material produzida pela coesão (atração química entre partículas, independente da força normal atuante), pelo ângulo de atrito interno (função da força normal atuante), do embricamento das partículas do material, presença de raízes de vegetação, etc. Frequentemente, a resistência ao cisalhamento é referida como a resistência dos solos (Carvalho et al., 1991; Augusto Filho, 1995; Gerscovich, 2009).

O mecanismo de estabilidade é semelhante ao existente entre corpos sólidos, em uma analogia à Lei de Atrito de Coulomb: para o deslizamento ocorrer é necessário que uma força tangencial T , componente do peso e proporcional a uma força normal N perpendicular ao plano considerado, seja maior que a força contrária de resistência. A relação e variação entre as forças são dadas pela Equação 1 com φ sendo o ângulo de atrito interno do material (Carvalho et al., 1991; Gerscovich, 2009).

$$T = N \times \tan \varphi \quad \text{Equação 1}$$

Em materiais contínuos, como os solos, as forças são transmitidas de partícula a partícula, em contatos pequenos. Assim, para qualquer plano do maciço, as forças podem ser decompostas em normais e tangenciais à superfície do plano, onde a relação entre a somatória das forças tangenciais (ΣT) e normais (ΣN) pela área total é dada pela tensão tangencial e tensão normal, respectivamente. A relação entre as tensões tangenciais τ , ou de cisalhamento, e das tensões normais σ é dada pela Equação 2, ainda dependente da coesão c do material (Carvalho et al., 1991).

$$\tau = c + \sigma \times \tan \varphi \quad \text{Equação 2}$$

A resistência ao cisalhamento s do depende da tensão normal σ , sendo maior a resistência quanto maior for a tensão normal, com c como a coesão do material e φ o atrito interno. Enquanto a tensão cisalhante for menor que a tensão normal, não ocorre ruptura. Este comportamento pode ser representado por uma envoltória de resistência, dada pela Equação 3, configurando a resistência ao cisalhamento do material e, sabendo a pressão neutra atuante, ela é expressa em termos de tensões efetivas (diferença entre tensão total e pressão neutra) extraindo o comportamento mecânico do solo (Guidicini e Nieble, 1984; Carvalho et al., 1991).

$$s = c + \sigma \times \tan \varphi$$

Equação 3

Para uma ruptura, além da ação da gravidade, considera-se ainda a inclinação da encosta, o clima, o tipo e comportamento do material e a presença de água e sua dinâmica de escoamento e infiltração. Os movimentos de massa são mais comuns em encostas íngremes, uma vez que as tensões cisalhantes são maiores e, relativamente, as tensões normais menores.

A água é a principal responsável pelo processo intempérico, pela mudança nas poro-pressões (por alterar a tensão efetiva e a resistência dos solos) e pelo aumento de carga quando mudanças no peso específico ocorrem. Além disso, pela relação entre escoamento superficial (*runoff*) e infiltração, considerando os regimes de fluxo subsuperficial, o comportamento da água pode promover erosões, internas e externas, acúmulos superficiais, alteração do nível do freático, poro-pressões e resistência dos solos. A água em excesso provoca a fluidificação dos solos por perda de resistência, deflagrado por chuvas intensas, ou esforços dinâmicos, ou amolgamento de argilas sensíveis (Gerscovich, 2009).

Figura 14 – Condição de estabilidade de encostas e taludes em função da inclinação do terreno, considerando a semelhança com o mecanismo de deslizamento entre corpos sólidos ao que se passa internamente no solo a título de ilustração da atuação das forças mobilizadoras e de resistência ao cisalhamento. Fonte: elaborado pelo autor.

4.5 Sinais de Instabilização do Terreno

Os movimentos de massa podem ter indicativos prévios de sua ocorrência, ou de sua movimentação, tais como trincas de tração no terreno, ou, em estruturas rígidas, degraus de abatimento inclinados, ou não, taludes ou escarpas, árvores inclinadas ou com troncos recurvados, estruturas rígidas ou lineares inclinadas ou deslocadas, feições erosivas, cicatrizes de deslizamento, áreas de depleção ou acumulação (e tipo de sedimento) e outras formas do terreno, como convexidades e

concavidades, indicativos de depleção ou acúmulo de material, elevações ou abatimentos transversais (Guidicini e Nieble, 1984). Estas feições são conhecidas como sinais, ou, evidências de instabilização, ou movimentação do terreno.

Para os deslizamentos a relação entre a resistência do material e as tensões de cisalhamento tem um decréscimo gradual gerando uma deformação progressiva do material, antes da ruptura, localizada acima da superfície potencial de ruptura. Esta deformação produz os sinais de instabilização do terreno, como as trincas, ou fendas de tração (Guidicini e Nieble, 1984).

Para Skempton e Hutchinson (1969), os movimentos pré-ruptura, são base para uma previsão da própria ruptura. O tempo destes movimentos varia dependendo do tipo e espessura do material e das condições de estabilidade da encosta, da mudança efetiva de tensões, ou de sua resistência, e em longo prazo da deterioração das propriedades do material. Flutuações nas poro-pressões, erosão, rastejo e outros processos de alívio de tensões controlam os movimentos.

As trincas de tração são comuns antes de uma ruptura, em deslizamentos, e influenciam o comportamento do material. Elas podem ser preenchidas por água (infiltração para camadas de solo inferiores, por exemplo), gerando esforços adicionais (empuxo) e reduzindo a resistência do solo (Carvalho et al., 1991). As trincas de tração são um dos principais indícios de um mecanismo de ruptura em andamento, apesar de sua ausência não indicar que não exista um processo de ruptura ativo, principalmente para os solos onde a ruptura pode ocorrer em qualquer parte do maciço terroso (Guidicini e Nieble, 1984).

As trincas de tração indicam que no interior da massa existe o início do processo de ruptura por cisalhamento apesar de movimentos poderem ser muito reduzidos e, assim, para Guidicini e Nieble (1984) o “efeito acumulado acarreta um deslocamento significativo na superfície”. Os degraus de abatimento se configuram como a evolução das trincas de tração na superfície do terreno composto de solos, mistura de solos e rochas e de aterros (Carvalho e Galvão, 2006).

A identificação dos sinais, fundamental para o entendimento dos processos de instabilização do terreno em análise, podem ser levantadas por registros históricos, relatos, mapas, fotografias, outros dados, por investigação geológico-geotécnica de superfície (trabalho de campo), por análise interpretativa de imagens orbitais, ou, de fotografias aéreas, terrestres e ortofotos. Estes levantamentos são complementares e

servem também para caracterização geológico-geotécnica inicial de uma encosta (Augusto Filho, 1995; Augusto Filho et al., 2018).

Os padrões diagnósticos para identificação de processos de instabilização e deslizamentos em fotos aéreas são dependentes da escala de obtenção das fotos, onde destacam-se também linhas de quebra nítidas em escarpas, ou presença de trincas, ou ambas; superfícies onduladas formadas por massas deslizadas; formas topográficas não naturais (concavidades, convexidades, formas irregulares); zonas de surgência d'água; depressões alongadas e não drenadas; canais de drenagem pouco espaçados; acumulação de detritos em canais de drenagem e vales; mudanças bruscas de tons claros e escuros, indicativos de umidade, feições, ou de vegetação; morfologia em degraus; formas embarrigadas e com erosão; cicatrizes na vegetação e encosta (Augusto Filho et al., 2018).

Os sinais de instabilização dependem do tempo decorrido das movimentações pré-ruptura, da própria ruptura e de eventuais movimentações pós-ruptura, de forma que podem apresentar diferentes características, permitindo datações relativas ou compreensão da evolução das instabilizações da encosta (Figura 15-A) (Augusto Filho et al., 2018). Exemplos de feições de movimentação na Figura 15-B.

Figura 15 – Feições de instabilidade: (A) ilustração dos efeitos de erosão em um deslizamento e seus sinais de instabilização (Brabb, 1991) e (B) exemplos das feições. Fonte: autor.

5. SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto (SR) é a ciência e a arte que, por meio de um dispositivo (sensor), tem por objetivo a obtenção de imagens e informações da superfície terrestre, à distância, por meio da detecção e medição das respostas da interação da energia eletromagnética, ou radiação eletromagnética (REM), de um objeto (alvo), área ou fenômeno. É uma das tecnologias de coleta de dados mais bem-sucedidas para levantamento e monitoramento de recursos naturais (Meneses e Almeida, 2012; Lillesand et al., 2015). Para Konecny (2014), o SR é o levantamento ou a identificação de objetos por meios indiretos com uso de campos de força, em especial do espectro eletromagnético, naturais ou artificiais, tendo como primeiro sensor o daguerreotipo inventado em 1839.

O SR é não intrusivo, com a coleta apenas da REM refletida, emitida ou retroespalhada pela superfície terrestre, não afetando seu estado presente, mesmo utilizando fontes ativas como o LiDAR, com a possibilidade de programação de aquisições sistemáticas e modelagem de processos naturais, ou causados pelo homem. Seu uso provê dados para estudo das mudanças dinâmicas do planeta em diferentes escalas de tempo e espaço.

Os sensores de SR são comumente divididos em: (1) sensores ópticos, os que utilizam a energia eletromagnética solar; (2) sensores termais, que utilizam a energia emitida pela Terra e (3) sensores ativos, como os radares imageadores e os sensores LiDAR, que utilizam fontes artificiais de energia eletromagnética.

A luz, ao incidir sobre os materiais terrestres, sofre (1) refletância, (2) transmitância e (3) absorvância, cujos valores dependem das propriedades ópticas de cada material.

Os materiais podem ser opacos (quando absorvem REM em quase todos os comprimentos de onda), ou transopacos (em um intervalo espectral tem baixa refletância e em outra alta). Ainda existem as interferências atmosféricas que diminuem o contraste espectral e as misturas de refletância em pixels dos alvos tornando difícil sua interpretação.

Neste trabalho foram revisados métodos de SR para obtenção de dados por fotografias aéreas (item 5.1) e perfilamento a laser, ou LiDAR, (item 5.2), além de considerações sobre suas aplicações em encostas (item 5.3), classificação e filtragem de nuvens de pontos (item 5.4) e detecção de mudanças (item 5.5).

5.1 Fotografia Aérea

No SR o termo fotografia é historicamente reservado para imagens que foram detectadas e gravadas em filme e o termo imagem é adotado para qualquer representação pictórica de dados de imagem. Assim, todas as fotografias são imagens, mas nem todas as imagens são fotografias. Exceção deve ser feita ao termo **fotografia digital** que não é uma fotografia no senso original por usar sensores eletrônicos, mas que foi comumente adotada para a técnica de coleta digital de dados (Lillesand et al., 2015).

A imagem obtida de forma fotográfica, ou eletrônica, pode conter dados de uma banda única que integra toda a energia de uma faixa do espectro eletromagnético, ou pode conter múltiplas bandas (Lillesand et al., 2015). Para toda imagem de SR o processo de sua formação acontece quando o sensor imageador capta a energia eletromagnética da radiação de pequenas amostras da superfície, denominadas de *pixel*, convertendo-os em sinal elétrico de intensidade equivalente à radiação em cada pixel. O sinal elétrico é filtrado e convertido em valores digitais dimensionados em BITS, e posteriormente convertido por *software* em valores de brilho (níveis, ou tons de cinza) (Meneses e Almeida, 2012).

A utilização de técnicas de fotografias aéreas, desde simples até sofisticadas, atualmente é encontrada nas mais variadas formas em aplicações para recursos naturais, resultado de inovações ao longo do século XX. As mais recentes em termos de câmeras e plataformas levaram a novas possibilidades científicas e comerciais na aquisição de fotografias aéreas (Jensen, 2009).

No contexto deste tipo de formato, as plataformas comumente empregadas eram suficientes para acomodar também o fotógrafo. Outras plataformas utilizadas incluem o uso de balões, pipas e outros sistemas de elevação da câmera sobre o solo. Contudo, plataformas aéreas remotamente pilotadas, também conhecidas popularmente como drones, ou VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado), fazem parte do conjunto de inovações que vem crescendo em utilização para fotografia aérea de pequeno formato de baixa altitude (Aber et al., 2010).

A fotografia aérea pode ser convencional (e atualmente digital) ao utilizar câmeras métricas de grande a médio formato, ou, de curto alcance (*close-range*) com câmeras de médio a pequeno formato e comerciais, voltadas ao público geral, não métricas, por terem atingido um alto padrão técnico.

5.1.1 Fotografia Aérea Convencional

Desde a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) a fotografia aérea evoluiu para grandes formatos, utilizada em mapeamento de precisão e cartografia, e para os pequenos formatos, utilizada para reconhecimento.

O grande formato desenvolveu a ciência da fotogrametria, as câmeras especializadas e aeronaves próprias para a atividade. Por sua especialização, qualidade, precisão e capacidade de cobertura de grandes áreas, os custos de obtenção de fotografias aéreas em grande formato são altos, e é justificada sua utilização em grandes áreas como projetos de engenharia, mapeamento topográfico e cartografia básica (Aber et al., 2010).

O alto custo, principal desvantagem, decorre também da necessidade de recursos humanos altamente treinados, assim como a possibilidade de situações potencialmente perigosas na operação de aquisição de fotografias.

5.1.2 Fotografia Aérea de Pequeno Formato

As câmeras compactas (p. ex., 35mm e 70mm), digitais ou não, encontradas no mercado para fotógrafos amadores, ou profissionais, de relativo baixo custo quando utilizadas formam a *Small Format Aerial Photography*, ou Fotografia Aérea de Pequeno Formato (Aber et al., 2010).

Elas não têm geometria fidedigna, ou resoluções espaciais comparáveis às câmeras de grande formato. As plataformas utilizadas no pequeno formato são mais flexíveis e incluem pipas, balões, VANTs, ou aeronaves mais sofisticadas, de relativo baixo custo em relação às aeronaves utilizadas no grande formato.

Esta configuração flexível entre plataforma e câmeras favorece uma logística mais simples de operação, com menor risco, não necessitando de equipe altamente treinada, tornando possível sua utilização para diversas aplicações.

5.1.3 Breve Histórico: fotografia, plataformas e fotogrametria aéreas

Os primeiros mapas de grandes cidades apresentavam ruas, construções e até pessoas de uma perspectiva aérea imaginada por artistas entre os séculos XVI e XVIII, simulando fotografias aéreas. Estas expressões vinham do desejo humano de observar a paisagem do ponto de vista de um pássaro, permitido apenas com a junção de duas inovações ocorridas em meados do século XIX (Aber et al., 2010).

O avanço tecnológico que hoje permite a utilização disseminada de plataformas aéreas não tripuladas com câmeras embarcadas para mapeamento advém de um histórico que remonta à descoberta da fotografia na França, entre 1826 e 1839, através da invenção de emulsões sensíveis à luz e por colocá-las em lâminas, ou placas, no interior de um instrumento conhecido, a *camera obscura* (câmera escura), para a fixação da imagem (Jensen, 2009).

A primeira fotografia foi obtida em 1827 pelo francês Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833), por uma exposição de oito horas que fez em parceria com Jacques Mandé Daguerre (1787-1851). Em 1834, o franco-brasileiro Hercules Florence (1804-1879) havia criado um processo similar, denominado de *photographie*. Daguerre tornou a fotografia prática em 1837 apresentando o daguerreotipo em 1839 (Baumann, 2014; Carneiro da Silva, 2015).

Outra inovação vem das tentativas de estabelecer o voo, após diversas experiências ao longo dos séculos, culminando nas primeiras invenções de êxito, como a dos balões em 1783. A primeira fotografia aérea que se tem registro é de 1858, tirada em Paris a bordo de um balão por Gaspard Félix Tournachon (1820-1910) (Figura 16-A). Foi o embrião dos levantamentos aéreos tal como os conhecemos atualmente (Jensen, 2009; Aber et al., 2010).

No ano de 1860, o norte-americano James Wallace Black (1825-1896) tirou fotografias a partir de um balão em Boston, EUA, tornando-as as mais antigas e preservadas fotografias aéreas conhecidas (Figura 16-B). As dificuldades encontradas fomentaram a procura por novas plataformas, como as pipas utilizadas por Arthur Batut (1846-1918), em 1888, para fotografar Labruquiere, França (Batut, 1890) e por George Raymond Lawrence (1868-1938), em 1906, para retratar São Francisco, EUA, após o terremoto de magnitude de 7,7. Em 1903, Julius Gustav Neubranner (1852-1932) patenteou câmeras aéreas automáticas que poderiam ser montadas em pombos (Wald et al., 1993; Baumann, 2014).

Em seguida ao estabelecimento da técnica de fotografia ocorre o surgimento da fotogrametria, uma nova ciência. Logo após a invenção de Daguerre, em 1840, Dominique François Jean Arago (1786-1853) foi o primeiro a utilizar fotografias em topografia, sendo o precursor da fotogrametria (Olague, 2016).

Figura 16 – Primeiras fotografias aéreas: (A) litografia de Nadar fotografando Paris de um balão, publicada em 1863 (Carneiro da Silva, 2015). (B) A mais antiga fotografia aérea, tomada por James Wallace Black, em 1860, a partir de de um balão de ar quente sobre Boston, EUA (BPL, 2018).

Em 1851, Aimé Laussedat (1819-1907), oficial do Corpo de Engenheiros do Exército da França, realizou os primeiros experimentos, utilizando princípios de matemática, geometria e ótica, para obter desenhos precisos em planta tendo desenvolvido o método de interseções de retas a partir de fotografias terrestres tiradas em perspectiva. Ele chegou a obter fotografias aéreas por meio de balões e pipas, porém, pelas dificuldades inerentes a estas plataformas, concentrou os esforços na fotogrametria terrestre, sendo reconhecido como o “Pai da Fotogrametria” (Ragey, 1952; Carneiro da Silva, 2015; Olague, 2016).

O termo Fotogrametria somente foi criado em 1855, pelo geógrafo Otto Kersten (1839-1900), e teve sua inserção em 1897 em um artigo do engenheiro civil Albrecht Meydenbauer (1834-1921) intitulado *Die Photogrammetrie* (A Fotogrametria, tradução do autor). O nome é derivado das três palavras gregas *phos*, ou *phot*, que significa luz, *gramma* que significa letra ou algo desenhado, e *metrein* o substantivo de medida (Schenk, 2005; Grimm, 2007; Carneiro da Silva, 2015).

A fotogrametria iniciou pelo modo terrestre passando às plataformas aéreas posteriormente (Carneiro da Silva, 2015). Laussedat estabeleceu de 1881 a 1900 o primeiro treinamento em fotogrametria em Paris, França (Ragey, 1952).

A fundação, em 1907, da Sociedade Austríaca de Fotogrametria (atual ISPRS, *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) e em 1934 da ASPRS, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, marcam respectivamente na Europa e na América do Norte o interesse da comunidade científica pela fotogrametria (Carneiro da Silva, 2015).

No final do século XIX e início do seguinte, as pesquisas e desenvolvimento das plataformas aéreas sofreu uma revolução: a invenção do aeroplano. Entre as iniciativas destacam-se as de Clément Ader (1841-1925) que realiza, em 1890, o primeiro voo em uma aeronave mais pesada que o ar seguido pelo voo realizado pelos Irmãos Wright, Orville (1871-1948) e Wilbur (1867-1912), em 1903. O brasileiro Alberto Santos Dumont (1873-1936) realizou voo no Campo de Bagatelle, Paris a bordo do 14-bis em 1906 (Baumann, 2014; Mendes, 2014; Schmitt e Gollnick, 2016).

Carneiro da Silva (2015) considera que um dos primeiros resultados práticos da fotogrametria aérea, embarcada em um aeroplano, foi obtido pelo oficial italiano do Corpo de Engenheiros da Itália, Capitão Cesare Tardivo (1870-1953) em 1911, através de um mosaico de fotografias aéreas da cidade de Veneza, Itália.

Em detrimento das controvérsias de quem teria sido o primeiro a tomar fotografias aéreas para fins de mapeamento utilizando um aeroplano (Wilbur Wright (1867-1912) em 1909, Tardivo em 1911, ou Friedrich Wilhelm Zinn (1892-1960) em 1914), Carneiro da Silva (2015) expõe que o mais provável foi em 1912 pela *Royal Flying Corps*, precursora da Força Aérea Britânica, com suas fotografias aéreas.

Para Campbell (2008) as fotografias aéreas são produto da combinação destas tecnologias, a câmera e o aeroplano, cujo salto de desenvolvimento se deu pela proximidade, durante a Primeira Grande Guerra, de expertise técnica suficiente para transformá-los para utilização conjunta. A fotografia aérea como instrumento de planejamento começou a ser utilizada em 1859, na batalha de Solferino, Itália, com fotografias aéreas a partir de balões (Konecny, 2014) e depois na Guerra Civil Americana (1861-1865) (Aber et al., 2010) com o mesmo tipo de plataforma aérea.

Com este mesmo propósito, foi também utilizada intensamente na Primeira Grande Guerra para obtenção de informações de locais de pouco conhecimento, embasando as estratégias de combate por meio de fotointerpretação de repetidas fotografias aéreas, chegando a ser responsável por dois terços de toda a informação obtida durante a guerra (Jensen, 2009). Somente no ano de 1918 milhões de fotografias aéreas foram obtidas pela Força Aérea Britânica demonstrando seu uso

para planejamento das batalhas (Figura 17). Em 1915, a primeira câmera aérea fotogramétrica foi fabricada (Konecny, 2014).

A Primeira Grande Guerra impulsionou um mercado pós-guerra de produtos fotogramétricos (Carneiro da Silva, 2015), e serviu de incubadora para o estabelecimento do reconhecimento aéreo, da fotointerpretação através de técnicas de simples, estabelecendo o início da fotogrametria para aplicações civis. Nos anos seguintes seu uso foi se tornando cada vez mais expressivo, facilitando as estratégias militares concatenadas ao desenvolvimento tecnológico armamentista, e à busca de novos sensores e plataformas aéreas (Campbell, 2008; Jensen, 2009).

A aerofotogrametria no pós Primeira Grande Guerra, em função do mercado em desenvolvimento, acaba por se consolidar como um método para obtenção de informações do terreno em grandes áreas que foi incorporando inovações resultantes de pesquisa e desenvolvimento para aprimoramento de instrumentos e processos, incluindo a fotointerpretação para as áreas florestal, glaciológica, arqueológica e da agricultura (Konecny, 2014).

A Segunda Grande Guerra (1939-1945) afirma a utilização das fotografias aéreas como instrumento de reconhecimento aéreo, abrindo caminho para o posterior desenvolvimento de tecnologias para observação ou reconhecimento de objetos, como o filme colorido em 1950, o Radar, o primeiro satélite meteorológico, em 1960, culminando em 1972 com o primeiro satélite para observação terrestre, o Landsat-1. Posteriormente, diversos satélites foram lançados com sensores embarcados de maior resolução, incluindo os hiperespectrais (Konecny, 2014).

Figura 17 – Uso da fotografia aérea em combate: (A) câmera aérea fixada na lateral de um aeroplano da *Royal Flying Corps* em 1915 (IWM, 2018a) e (B) exemplo de fotografia retratando um aeroplano com uma câmera aérea instalada, na França durante a Primeira Grande Guerra (IWM, 2018b).

A fotogrametria passou por pelo menos quatro ciclos, sendo eles o de prancheta (logo no início do surgimento da fotogrametria), analógica, analítica e a digital, coincidentes com mudanças de paradigma de princípios científicos e tecnologias inovadoras (Konecny, 1996).

O primeiro ciclo ocorreu no surgimento da fotogrametria quando os processos eram utilizados para o planejamento de construções. Na década de 1920 foram desenvolvidos equipamentos analógicos, marcando o segundo ciclo, para a reconstrução mecânica ou óptica dos raios fotográficos. Os processos analíticos envolviam cálculos matemáticos que consumiam tempo. Nas décadas seguintes houve progresso na instrumentação analógica que traria o aumento da eficiência e acurácia dos processos e na redução dos requerimentos de controle dos levantamentos fotogramétricos (Linder, 2009; Konecny, 2014).

De 1956 a 1976, o desenvolvimento passou da fase analógica, ou clássica, para a analítica com ajuda da computação eletrônica, desenvolvida desde 1941. No final da década de 1950, Duane Brown, Helmut Schmid (1914-1998), Karl Rinner (1912-1991) e E.H. Thompson, depois de Earl Church desenvolver a orientação analítica em 1940, desenvolveram a foto-triangulação por feixes de raios perspectivos para blocos fotogramétricos, com análises estatísticas e autocalibração para correção das lentes e outros erros sistemáticos, conhecido também como *bundle block adjustment* (Konecny, 1996; Trinder e Fritz, 2008; Olague, 2016).

O surgimento da computação revolucionou as ciências pelo desenvolvimento de *hardware* e *software* necessários para armazenamento e processamento de imagens digitais. Houve a criação da fotogrametria digital, que utiliza fotografias digitais, marcando nova mudança pelo desenvolvimento de sistemas imageadores de alta resolução. O ajustamento por feixe de raios ainda é a melhor abordagem quando se requer alta acurácia (Konecny, 1996; Olague, 2016).

Os sistemas digitais devem substituir integralmente os sistemas analógicos. Reulke (2003) considera os sistemas digitais econômicos (sem filmes ou laboratórios), com eficiência na geração de produtos (sem revelação ou escaneamento e com possibilidade de automação), e com melhor qualidade das imagens. Inovações tecnológicas em sensores e sistemas ativos (SAR, laser) permitem modelagem 3D em ambiente de computação visual, resultantes de um processo contínuo de integração de métodos das áreas de fotogrametria, sensoriamento remoto e computação visual (Kettle e Reulke, 2005).

No Brasil, Mendes (2014) faz um levantamento histórico que se inicia com o interesse popular pela aviação citando Alberto Santos Dumont (1873-1936) e Dimitri Sensaud de Lavaud (1882-1947), que realizou o primeiro voo da América Latina em Osasco no ano de 1910, até as primeiras fotografias aéreas feitas a partir de um aeroplano por Roland Garros (1888-1918) em 1912 no Rio de Janeiro, com interesse estendido posteriormente para São Paulo.

Nos anos seguintes, investimentos e interesse público crescentes, com exceção durante a Primeira Guerra Mundial, culminam em arcabouço que leva ao desenvolvimento da fotogrametria aérea e apesar de o Brasil acompanhar com ligeiro atraso (Carneiro da Silva, 2015) Mendes (2014, p.32) alega para a fotogrametria:

A fotogrametria, em aplicação prática desde as duas últimas décadas do século XIX, não parece ter registro no Brasil até o início do século XX. [...] a fotogrametria tinha uso estabelecido na Europa e América do Norte.

Com algumas iniciativas isoladas no país, a cidade de São Paulo foi a primeira a contar com um levantamento aerofotogramétrico em toda sua extensão, realizado pela empresa SARA Brasil S/A entre 1928 e 1930 (Figura 18). Posteriormente, estes levantamentos tornaram-se comuns no país (Carneiro da Silva, 2015).

Figura 18 – Recorte do Mapa Topográfico do Município de São Paulo, de 1930 (1:5.000), realizado a partir de restituição aerofotogramétrica pela empresa SARA Brasil S/A. Fonte: PMSP (2019).

Uma série de instituições governamentais têm destaque no desenvolvimento da fotogrametria no Brasil, tais como: Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG) onde, em 1912, é criada a seção de Estereofotogrametria; a Sociedade Brasileira de Cartografia, fundada em 1958 com fins técnico-científicos, onde duas comissões técnicas foram criadas, de fotogrametria e de fotointerpretação; e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde são usadas técnicas fotogramétricas digitais para mapeamento sistemático (Carneiro da Silva, 2015).

5.1.4 Avanços recentes

Avanços técnicos e científicos, motivados tanto pelos aspectos militares, no início, como os práticos e científicos, de observação de recursos naturais e do meio ambiente, tornaram possível novas formas de obter imagens. O rápido desenvolvimento de técnicas fotogramétricas digitais, da computação visual e de diferentes plataformas, cada vez menores e eficientes, permitiu o crescimento de um mercado especializado nos últimos anos, o das aeronaves não tripuladas para geração automatizada de produtos cartográficos de alta qualidade.

Os Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT, ou do inglês, *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) são também conhecidos popularmente por *drones*, ou por sistema de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS, do inglês *Remotely Piloted Aircraft System*). A última forma é a denominação oficial adotada no Brasil pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), e pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), órgãos do Governo Federal, para as aeronaves usadas para fins não recreativos (Brasil, 2017; Brasil, 2018).

Em termos de RPAs, Fahlstrom e Gleason (2012) ressaltam o termo **sistema** por entenderem que são compostos por vários subsistemas que se relacionam e interagem, completando um único sistema estruturado de aeronave não tripulada. Os subsistemas são as estruturas físicas, elementos aerodinâmicos (asas, rotores e superfícies de controle), sistemas propulsores e de controle, além da carga útil (*payload*) para os sensores, pacotes de comunicação e sistemas de lançamento e recuperação (Figura 19).

O conceito geral é que eles sejam controlados a distância por uma central, onde fica um operador ou piloto, com as localizações medidas e transmitidas por sistemas de posicionamento global, como o GPS (*Global Positioning System*), e um sensor para aquisição de imagens, como uma câmera fotográfica, embarcados.

Figura 19 – VANT comercial desmontado, com os subsistemas eletrônicos miniaturizados de controle e navegação, posicionamento, propulsão, rádio comunicação, sensores, entre outros. Fonte: modificado de Torborg (2018).

A principal vantagem destas aeronaves é a falta de tripulação, o que evita eventuais acidentes e perdas de vidas humanas. Outras características são o porte reduzido, a praticidade de utilizar diferentes sensores e a capacidade de transmitir em tempo real, para a base controladora, as imagens obtidas em voo.

Estas características também refletem em baixo custo de operação para fins de monitoramento de recursos naturais, planejamento urbano e outros. Iniciativas ainda mais baratas, com o mesmo escopo, iniciaram-se no campo do aeromodelismo e atualmente são tecnologias consagradas (Jensen, 2009).

Em termos de aquisição de fotografias aéreas e mapeamento para recursos naturais, as plataformas mais comuns de RPAs são as multirrotor e asa fixa (Figura 20). A primeira é adequada para atividade de mapeamento de grandes áreas, por terem autonomia maior em relação aos multirrotoreiros, enquanto a segunda é utilizada para inspeções e mapeamentos de detalhe.

A empresa chinesa DJI iniciou suas atividades no ano de 2006, virando referência de fotografia aérea na indústria civil por fabricar RPAs de pequeno porte e grande sucesso comercial, como a linha Phantom (DJI, 2019). Ela é uma das responsáveis pela popularização dos drones, junto com outras empresas, como a norte-americana 3DRobotics e a francesa Parrot, que juntas ajudaram o crescimento do mercado para as áreas de aerolevantamento, segurança, gerenciamento, mapeamento, modelagem, monitoramento, entre outras, por meio de equipamentos relativamente baratos e disponíveis ao grande público.

Figura 20 – Tipos de plataformas de RPAs para fotografia aérea, mapeamento e inspeções. Fonte: divulgação das empresas fabricantes dos RPAs.

Os VANTs têm se tornado uma importante plataforma nos últimos anos para a aquisição de dados de SR pela versatilidade e flexibilidade dos sistemas, desde a diversidade de tamanhos, possibilidade de voos parcial ou totalmente autônomos, em baixa altitude, proporcionando alta resolução, e pelos diferentes sensores disponíveis: ópticos, termais, multiespectrais, LiDAR, entre outros (Lillesand et al., 2015).

5.1.5 Câmeras aéreas e princípios básicos de fotografia aérea

Desde a primeira câmera, desenvolvida por Daguerre e Morse em 1839-1840, suas características básicas permanecem as mesmas até a atualidade, inclusive nas câmeras destinadas ao público em geral (Jensen, 2009; Linder, 2009).

As câmeras são compostas pelo plano focal ou plano de imagem (onde se localizam o filme sensível à luz nas câmeras analógicas e o sensor digital nas digitais), pelas lentes para focalizar a luz no plano do sensor, pela abertura da lente que controla a quantidade de luz que adentrar a câmera e pelo obturador que controla a exposição ou o tempo que a objetiva fica aberta para a passagem da luz a ser captada (Figura 21).

A distância focal (f) é a distância entre a parte traseira da objetiva (onde se encontra a lente) e o plano focal, ou de acordo com a Equação 4.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \text{Equação 4}$$

Figura 21 – Elementos ópticos de uma câmera aérea. Fonte: modificado de Farnik (2010), baseado em Jensen (2009, p. 98).

Onde a é a distância entre o centro de projeção e o ponto do objeto, b é a distância entre o centro da projeção e o ponto da imagem, e f é a distância focal da lente (Jensen, 2009; Konecny, 2014).

A razão entre a distância focal da objetiva da câmera (f) e o diâmetro de abertura da objetiva (d) é chamada de $f/stop$, ou a abertura relativa da objetiva (Equação 5). Quanto menor o $f/stop$, maior o diâmetro de abertura do diafragma da objetiva da câmera e vice-versa (Figura 22-A). Esta relação é também definida como a medida de velocidade da objetiva por relacionar a quantidade de luz que passa pelo diafragma do obturador em seu diâmetro de abertura máxima por unidade de tempo (Jensen, 2009).

$$f/stop = \frac{f}{d} \quad \text{Equação 5}$$

Nas câmeras digitais com disparador tipo *global shutter* (quando as cenas são capturadas integralmente pelo sensor pela abertura do diafragma) isto também se aplica. Em contrapartida, existem as câmeras tipo *rolling shutter* (sensor de varredura), maioria das câmeras “*consumer grade*” digitais do mercado e a maioria das que equipam os RPAs, em que as fotografias são formadas pelo escaneamento rápido vertical, ou horizontal, fazendo com que partes da imagem sejam captadas em momentos distintos, gerando distorções geométricas em cenas de movimento e exigindo retificações ou compensações posteriores (Figura 22-B).

Figura 22 – Obturadores de câmeras: (A) relação entre o valor de $f/stop$ com abertura do diafragma mecânico de uma objetiva. (B) Efeito *rolling shutter* em uma cena estática e uma dinâmica.

A difração é um fenômeno inerente à física da luz, e é acentuada ao estreitar a passagem da luz, ou quanto maior o valor de $f/stop$, causando a deterioração da resolução das fotografias e sua limitação por difração (Cox, 2018; Cambridge in Color, 2018).

O tempo de exposição ou velocidade do obturador em fotografia é o tempo que o obturador permanece aberto para a passagem de luz, e sua unidade é segundos (por exemplo, 1/100s, 1/200s, 1s, etc.). Para a fotografia aérea é necessário um curto tempo de abertura do obturador, de modo que o voo da plataforma não seja comprometido em eficiência.

A correta configuração da medida da sensibilidade dos filmes, ou do sensor digital para a luz disponível (ISO, acrônimo para *International Organization for Standardization*), permite realizar o levantamento aéreo nas mais diversas condições de luminosidade. Quanto maior o valor do ISO, maior o ruído incorporado nas fotografias tomadas.

Valores menores de ISO, 100 a 200, fazem o sensor apresentar menor sensibilidade à luz, sendo ideal para dias ensolarados e cujo requisito seja a obtenção da qualidade máxima das fotografias. Configurações com valores médios, 200 a 400, são ideais para dias nublados ou para capturar movimento em dias com boa luminosidade. As configurações com altos valores de ISO, 500 a 800 ou maiores, são para condições de baixa luminosidade ou para noite onde o ruído proveniente não importa para o que se quer imagear (Radulescu e Vladaleanu, 2017). Idealmente, para obtenção dos melhores resultados na fotografia aérea para mapeamento aéreo é necessário empregar o menor valor possível de ISO para preservar as fotografias do ruído inerente de configurações com valores maiores, e para alcançar a máxima qualidade possível das fotografias.

Assim, a exposição em qualquer câmera fotográfica, seja ela digital ou analógica, é controlada por três componentes principais: (1) abertura do diafragma ou *f/stop*, (2) o tempo de exposição e (3) sensibilidade do sensor ou do filme.

A relação entre a abertura e o tempo de exposição para a tomada de fotografias aéreas merece atenção para que mudanças na iluminação, como por exemplo, a mudança de um tempo ensolarado para um tempo nublado, ou de menor luminosidade com conseqüente menor iluminação da superfície a ser imageada, sejam compensadas aumentando-se a abertura da objetiva ou o tempo de exposição (Figura 23). As corretas combinações de tempo de exposição e abertura do diafragma são necessárias para que as fotografias não fiquem superexpostas ou subexpostas, assim gerando fotografias de boa qualidade e exposição às condições de iluminação do terreno (Jensen, 2009).

A configuração ideal de uma câmera é com o menor valor de ISO, fixo, para se evitar os ruídos nas fotografias, somado com a menor velocidade do obturador para evitar fotografias borradas por movimento (do próprio voo e de instabilidades da câmera), e a abertura do diafragma compatível com esta velocidade, sendo a maior possível (permitindo maior entrada de luz, menor distorção por difração e maiores velocidades do obturador).

Figura 23 – Comparação de fotografias aéreas modificadas digitalmente para fins ilustrativos de exposição, com seus respectivos histogramas RGB abaixo: (a) subexpostas (-2,0), (b) exposição correta capturando o máximo possível de sombras e realces da cena, e (c) superexpostas (+2,0). Notar a perda de nitidez, contraste e de informações interpretativas em ambos os extremos. Fonte: elaborado pelo autor.

Os diferentes tipos de câmeras aéreas, como as apresentadas por Jensen (2009), influenciam diretamente nas técnicas fotogramétricas. E existem as câmeras métricas, de grande formato, com uma objetiva (cartográficas) ou múltiplas objetivas (múltiplas bandas), analógicas, ou digitais. E as câmeras de pequeno a médio formato, digitais, mais recentes. Estas contam com parâmetros conhecidos e geometria definida, necessitando de pessoal especializado para sua operação e produção de produtos cartográficos.

As câmeras digitais, com o desenvolvimento dos últimos anos, ajudaram a revolucionar a coleta de dados aerofotogramétricos e seu funcionamento é como as câmeras analógicas. A diferença é que os sensores destas câmeras utilizam circuitos integrados, como o CCD (*Charge-Coupled Device*) de carga acoplada e o CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) de semicondutor metal-óxido que convertem a luz em elétrons, ou sinal analógico, que são medidos e convertidos para digital em valores de intensidade radiométrica, podendo ser lido por computadores (Jensen, 2009).

As mais recentes em utilização para fotografia aérea, no entanto, são as câmeras digitais comerciais, não métricas, relativamente baratas e que podem ser utilizadas por terem atingido um nível de qualidade adequado para este fim. Quando usadas com técnicas de computação visual e de *hardware* de alto desempenho podem ser inseridas na fotogrametria. Estas câmeras têm geometria interior variável (distância focal, coordenadas do ponto principal) e distorções que devem ser modeladas. A maioria destas captura as imagens pelo método *rolling shutter*, que deve ser compensando no processamento das imagens.

Para todos os tipos de câmera existem relações importantes de campo de visada angular, dependente dos tipos de objetivas e altura de voo, que refletem diretamente na superfície do terreno a ser fotografada para um voo a mesma altura, ou de alturas diferentes (Figura 24). As teleobjetivas têm o campo de visada angular com menos de 60°, as objetivas normais variam entre 60° a 75°, as grande angulares entre 75° e 100°, e as supergrande angulares com mais de 100° (Jensen, 2009).

As fotografias aéreas podem ser obtidas de duas formas: (1) com visada vertical, e (2) com visada oblíqua (Figura 25), dependendo da finalidade do projeto (Jensen, 2009). Estas formas independem da captura por grande, médio ou pequeno formato, ou se serão utilizadas em processos fotogramétricos convencionais, ou, nos mais recentes, por computação visual.

Figura 24 – Importância do campo de visada angular em consequência da objetiva (esquerda) para uma mesma altitude de voo e diferentes ângulos, e (direita) para diferentes altitudes de voo com a mesma objetiva. Fonte: modificado de Jensen (2009, p. 101).

Figura 25 – Formas de obtenção de fotografias aéreas: (A) nadir e (B) off-nadir. Fonte: modificado e traduzido de Jensen (2009, p. 96).

No primeiro caso, uma fotografia aérea é vertical quando o eixo ótico da câmera é aproximadamente perpendicular à superfície imageada, também conhecido como imageamento *nadir*. Com estas fotografias é possível realizar análises qualitativas para interpretação de geologia, relevo e hidrologia por meio de fotointerpretação clássica, de aspectos texturais e padrões de drenagem. Quando diferentes imagens aéreas verticais são sobrepostas, com deslocamento entre elas, se obtém informações quantitativas, tais como mapas planimétricos, mapas topográficos, modelos digitais de elevação (MDE) e ortofotos.

O segundo caso, das fotografias aéreas obtidas com visada oblíqua (ou inclinada), ocorre quando o eixo ótico da câmera está deslocado da vertical, conhecido também como imageamento *off-nadir*. Sem a visualização do horizonte recebe o nome de fotografia aérea oblíqua-baixa e, com o horizonte visível, de fotografia aérea oblíqua-alta. Normalmente, este tipo de fotografia aérea não é utilizado para obtenção de informações quantitativas na fotogrametria convencional. Para as técnicas fotogramétricas por computação visual, sua utilização não é um impedimento já que as fotografias oblíquas tendem a realçar a geometria de objetos e da superfície do terreno, sendo inclusive indicadas para mapeamentos 3D. O posicionamento ideal para a tomada de fotos aéreas oblíquas é aquela em que as feições e objetos de interesse apareçam em uma perspectiva natural.

5.1.6 Fotogrametria digital

Fotogrametria, tanto analógica quanto digital, é a arte, ciência e tecnologia de se obter informações confiáveis, gravações, medições precisas e interpretações de objetos e do ambiente por meio de fotografias aéreas e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos (Jensen, 2009; Aber et al., 2010). Ou pela definição de Konecny (2014), a fotogrametria é a tecnologia para derivar as informações geométricas de objetos com a ajuda de medidas em imagens.

A origem da fotogrametria remonta às da própria fotografia e inicialmente foi baseada em processos analógicos e óticos tendo migrado, atualmente, para a fotogrametria digital com base em algoritmos de computação visual e em imagens digitais (Aber et al., 2010).

De uma fotografia somente é possível obter medidas bidimensionais (2D). Para obtenção de coordenadas 3D (x , y , z) de um determinado ponto P , principal objetivo da fotogrametria para Linder (2009), são necessárias pelo menos duas imagens de diferentes posições (Figura 26) em paralaxe estereoscópica, com o ponto P é representado pelo menos uma vez em cada imagem (P' e P'').

Ao se reconstruir a geometria da cena (localização das câmeras em relação à altura e ângulo de visada; posicionamento relativo, orientação das imagens, nadir e *off-nadir*), é possível calcular as coordenadas tridimensionais do ponto P .

Figura 26 – Geometria de um modelo estéreo orientado. Fonte: traduzido de Linder (2009), p.2.

Os RPAs comerciais com câmeras digitais não métricas têm objetivas fixas com ângulo de visada conhecido, permitindo a variação da altura do voo para influenciar na cobertura do terreno e na resolução das imagens.

Na fotogrametria aérea, as linhas de voo são linhas orientadas espacialmente para que a plataforma percorra a uma velocidade e altura sobre o solo determinadas, em que as exposições são tomadas a um intervalo definido. Cada uma destas fotografias cobre uma área do terreno (*footprint*) e, tomadas sucessivamente, ocorre uma sobreposição entre as áreas cobertas no terreno. Para cobrir uma área de interesse, sucessivas linhas de voo são realizadas paralelas umas às outras, com sobreposição lateral determinada. Estas múltiplas linhas de voo são denominadas de blocos de fotografias aéreas (Figura 27). A linha de voo real é determinada pela conjugação dos pontos principais de cada fotografia, uma vez que cada um deles é o ponto para onde o eixo ótico da câmera estava orientado para o terreno.

A sobreposição fornece pelo menos duas visadas fotográficas de feições na superfície do terreno. Na fotogrametria convencional, com câmeras métricas analógicas ou digitais, a sobreposição frontal varia entre 60% a 80%, esta última para terrenos montanhosos. Na sobreposição lateral o usual é ter cerca de 20 a 30% (Jensen, 2009).

Figura 27 – (A) Linhas de voo e (B) blocos fotogramétricos. Fonte: modificado de Jensen (2009, p. 152).

A partir desta geometria de voo, com a estereoscopia proporcionada pelos blocos fotogramétricos, é possível obter medidas, localização, modelos digitais de elevação, entre outros, através de pacotes de *software* de processamento fotogramétrico convencional, ou dos que utilizam computação visual (Gini et al., 2013).

A altura de voo sobre o solo influencia diretamente as imagens captadas, então, considerando um sensor com determinada resolução, para alturas de voo maiores cada célula deste sensor irá imagear uma área maior do terreno e, conseqüentemente, a distância entre os centros dos pixels no solo imageado será maior, enquanto em alturas menores esta distância diminui. Este conceito é conhecido como *Ground Sample Distance* (GSD), que representa a distância em solo entre os centros de dois pixels consecutivos (Figura 28). Assim, quanto maior o valor do GSD, menos detalhes são individualizados. O GSD pode ser calculado pela Equação 6.

$$GSD = H \times S_L \times 100 / f \times I_L \quad \text{Equação 6}$$

Onde H é a altura sobre o solo do voo em metros, S_L é a largura do sensor em milímetros, f a distância focal em milímetros e I_L a largura da imagem em pixels.

Em uma única imagem diferentes valores de GSD podem estar presentes, derivados de superfícies desiguais, que, localmente, aumentam, ou diminuem, a distância em solo entre os centros dos pixel. Para compensar este comportamento e manter o GSD constante, diferentes abordagens podem ser realizadas, especialmente para as áreas com diferenças altimétricas significativas (Figura 29).

Figura 28 – Conceito de *Ground Sample Distance* (GSD). Fonte: modificado de Kluger (2008).

Figura 29 – Diferentes configurações de voo para obtenção de GSDs e sobreposições uniformes. (A) múltiplos voos em sobreposição; (B) voo único seguindo a morfologia do terreno; (C) voos em sobreposição seguindo a morfologia do terreno; e (D) voos em diferentes alturas sobre o solo em sobreposição e seguindo a morfologia do terreno. Fonte: elaborado pelo autor.

As abordagens dependem do tipo de plataforma aérea, do planejamento de voo e da capacidade de reconstrução da geometria a partir das configurações de voo. Os RPAs têm grande flexibilidade e a técnica de fotogrametria por computação visual leva vantagem por suas etapas automáticas para extração de pontos homólogos e autocalibração.

Na fotogrametria convencional a localização 3D dos pontos (coordenadas espaciais) de uma cena reconstruída é determinada utilizando a posição 3D e a localização da câmera no momento de captura da imagem. Quando a localização e posição das câmeras não estão disponíveis, a reconstrução da geometria da cena é feita por triangulação, método para calcular distâncias indiretamente. Outra forma é pela utilização de uma série de pontos de controle do terreno, com localização 3D conhecida, inseridos em cada uma das fotografias respectivas para a estimativa da posição das câmeras (Westoby et al., 2012).

A fotogrametria por *Structure from Motion-Multi-View Stereo* (SfM-MVS) é um avanço, ou desenvolvimento, da técnica convencional de fotogrametria ao utilizar a computação visual, não necessitando da posição e localização das câmeras, nem previamente dos pontos de controle para reconstruir a geometria de uma cena.

A reconstrução é feita, inicialmente, pela identificação automática de pontos homólogos (*tie points*) nas múltiplas imagens, permitindo derivar estimativas da posição das câmeras em um sistema de coordenadas arbitrário e as calibrações de cada imagem *bundle block adjustment* (ajustamento por feixe de raios). A reconstrução obtém a localização espacial pela inserção de pontos de controle do terreno, ou metadados, com posterior densificação da nuvem (Westoby et al., 2012).

5.1.7 Fotogrametria por *Structure from Motion* - SfM

Na literatura de computação visual SfM se refere apenas à etapa de estimativa da estrutura 3D e da posição das câmeras para as fotografias (Carrivick et al., 2016). A SfM foi desenvolvida entre as décadas de 1970 e 1990 e somente com o avanço da computação é que sua utilização com se tornou possível pelo alto desempenho computacional requerido (Westoby et al., 2012; Peterson et al., 2015).

No entanto, a SfM-MVS tem sido entendida como uma técnica fotogramétrica que abrange várias etapas que, como a fotogrametria convencional, objetiva gerar medidas 3D a partir de imagens sobrepostas. Para se obter a estrutura derivada do movimento uma alta sobreposição entre as imagens adquiridas ao cobrir uma superfície, ou objeto de interesse, é necessária. Por esta característica, as porcentagens de sobreposição entre as imagens de um bloco fotogramétrico processado por SfM devem ser maiores do que na fotogrametria convencional (Westoby et al., 2012; Micheletti et al., 2015).

Outra diferença é na determinação automática da geometria interna, posição e orientação das câmeras, sem obrigatoriedade de pontos de controle em coordenadas 3D conhecidas. A SfM-MVS utiliza um conjunto de algoritmos da computação visual que facilitam a extração de medidas de imagens, quando sobrepostas umas às outras e tomadas de diferentes visadas, através da detecção e alinhamento automático de feições nas imagens para triangular posições e gerar nuvens de pontos 3D. Também é conhecida como fotogrametria de múltiplas visadas, ou *multi-view photogrammetry* (Westoby et al., 2012; Peterson et al., 2015; Carrivick et al., 2016).

Este trabalho adota o conceito do SfM-MVS como uma técnica fotogramétrica e não apenas uma etapa (Figura 30): (a) múltiplas exposições tomadas em diferentes posições com uma câmera digital gerando os conjuntos de imagens digitais de entrada; (b) identificação e descrição de feições nas imagens; (c) estabelecer relações espaciais (correspondência) entre os pontos homólogos; (d) filtragem dos pontos homólogos; (e) *Structure from Motion*, estimativa da estrutura 3D e da posição das câmeras; (f) georreferenciamento, caso as imagens não tenham coordenadas, por meio de pontos de controle (g) densificação da nuvem de pontos. (Westoby et al., 2012; Peterson et al., 2015; Micheletti et al., 2015; Carrivick et al., 2016).

O descritor mais comum utilizado é o *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), proveniente da computação visual, essencial para a calibração da câmera, registro entre as imagens, reconhecimento de objetos e reconstrução 3D. O SIFT (Lowe, 2004) é aplicado para a extração e descrição de feições invariáveis (à mudanças de escala, visada, rotação, iluminação e ruídos) das imagens, estas utilizadas para realizar correspondências entre diferentes visadas de um objeto. A filtragem dos pontos homólogos é realizada por algoritmos (p. ex., RANSAC) que os organizam para a reconstrução (Carrivick et al., 2016).

Em fotogrametria, os *Key points* (pontos chave) são pontos de interesse, ou feições reconhecíveis, em uma imagem em diferentes escalas e rotações, e descritos por seus aspectos texturais e de contraste, que podem ter correspondências nas demais imagens. Um *tie point* (ponto de amarração) é um conjunto de *key points*, de diferentes imagens, que têm as mesmas projeções para um ponto 3D. São conhecidos como pontos homólogos, ou correspondentes, das mesmas feições, utilizados para calcular pontos 3D. Todos os *tie points* válidos formam a nuvem de pontos esparsa utilizada para amarrar o bloco fotogramétrico e recuperar informação de posição das câmeras e realizar a autocalibração.

Figura 30 – Processo SfM: desde a entrada de imagens até a reconstrução 3D esparsa inicial.

A etapa de SfM estima a estrutura 3D, a orientação e posição das câmeras (orientação externa) e a orientação interna (parâmetros de calibração). A câmera é modelada para correção de distorções da lente pelo método de autocalibração, restringida pelos metadados das imagens, se existentes. O *bundle adjustment* (ajustamento por feixe de raios) é utilizado para melhorar as estimativas, ou minimizar os erros, da estrutura 3D, posição e calibração para cada par de imagens (também pode ser realizado globalmente para todas as câmeras). O resultado é uma nuvem de pontos esparsa (*sparse point cloud*, ou *tie points*) e nas posições das câmeras no momento de tomada de cada imagem (Carrivick et al., 2016).

Para imagens que não têm coordenadas geográficas em seus metadados, as nuvens de pontos apresentam um sistema de coordenadas arbitrário. A transferência dos pontos 3D para o mundo real, se necessária, é realizada pela inserção de coordenadas nos alvos presentes nas imagens (a identificação em nuvens de pontos seria uma tarefa complexa). Os alvos são as representações de pontos do terreno, do mundo real, com coordenadas conhecidas. Independente das imagens terem coordenadas, ou não, pode-se utilizar as obtidas por um sistema de alta precisão (dGNSS) e inseri-las por meio dos alvos. Além de referenciar e escalar as nuvens de pontos ao sistema de coordenadas desejado estes pontos precisos servem como correspondências verdadeiras entre as imagens, melhorando o desempenho do ajustamento por feixe de raios (Carrivick et al., 2016).

A nuvem de pontos esparsa é densificada pela técnica de *Multi View Stereo* (MVS), por meio do cálculo de mapas de profundidade, por exemplo, que gera dados de alta resolução, enquanto isola erros grosseiros, resultando em nuvens de pontos 3D densas (Micheletti et al., 2015; Carrivick et al., 2016).

5.1.7.1 Alvos (*targets*)

Dentro do contexto deste trabalho, em detrimento de outras conceituações como a de Fahlstrom e Gleason (2012), os alvos são a representação visual em imagem dos pontos de apoio de campo (controle e verificação) distribuídos na área de estudo, e necessários para georreferenciar o modelo (Figura 31).

Os alvos podem ser naturais, quando são referências, feições, ou marcos no próprio terreno e em áreas urbanas, ou artificiais (construídos) com a finalidade de locar os pontos de apoio em terrenos que não têm feições foto-identificáveis (terrenos monótonos, sem aspectos texturais próprios).

Os alvos devem ter contraste em relação ao seu entorno imediato para que sejam identificados nas imagens, o que é dependente de seus tamanhos e constituição (material, rugosidade, tinta, cores, etc.), da superfície do terreno e entorno (materiais, composição, cores etc.), da iluminação solar, da câmera (tamanho do sensor, resolução e se o obturador é de varredura eletrônica ou global) e do GSD (altura de voo). Em geral os alvos devem ser claros em superfícies de baixa refletância, ou pouco iluminadas, e vice-versa, com tamanhos adequados ao GSD planejado em escritório.

A identificação do centro do alvo é deteriorada conforme o aumento da altura de voo (aumento do GSD), com maior incerteza na marcação do ponto durante a etapa de processamento e, conseqüentemente, dos erros totais na correção da posição da reconstrução com o mundo real (Figura 32).

Figura 31 – Exemplos de alvos artificiais e de alvos naturais Fonte: Agisoft (2019a), <http://geodrones.com.br/blog/> (acesso em 26/09/2017) e fotos tiradas pelo autor.

Figura 32 – Diferença de visualização de um alvo de 0,40m de lado conforme a altura de voo sobre o solo e em câmeras distintas (12MP *rolling shutter* e 21MP *global shutter*). Fonte: elaborado pelo autor.

5.1.7.2 Pontos de apoio

Os pontos de apoio são coletados em campo por métodos de alta acurácia (dGNSS) e (Figura 33) são divididos conforme utilização no processamento das imagens: (1) pontos de controle, ou, *Ground Control Points* (GCP), identificados por alvos em imagens com coordenadas e que aproximam a reconstrução 3D do mundo real e (2) pontos de verificação, ou *check points*, para observar a distância dos dados ao mundo real.

Os RPAs, em geral, têm a bordo receptores de navegação, acurácia entre 5 a 10 m, cujas imagens obtidas têm esta mesma acurácia de localização e dados processados com cerca de 2m total, ou pior. Os pontos de controle aprimoram este posicionamento, além de mitigar eventuais distorções nos dados e servir como pontos homólogos verdadeiros. A alta precisão é necessária, por exemplo, para realização de medições e do monitoramento da evolução de terrenos.

São necessários pelo menos quatro pontos de controle para fazer a amarração dos dados às coordenadas, sendo recomendável cinco pontos, com distribuição homogênea na área, se possível, e locados nas extremidades, porém distantes dos limites da área de imageamento para que sejam incluídos no processamento. Cada um deles deve estar claramente marcado em solo (alvos) e desobstruídos, fora das áreas de sombra, ou de alta refletância, para que sejam fotoidentificáveis.

Os pontos de verificação são utilizados para avaliar a acurácia pelo cálculo da distância entre os dados 3D, amarrados pelos pontos de controle, e o mundo real. Ou seja, são utilizados para comparar as medidas da reconstrução com as medidas realizadas em campo pelo dGNSS.

Recentemente, os RPAs têm recebido sistemas de posicionamento de alta precisão, como DJI Phantom 4 RTK, possibilitando o georreferenciamento direto das imagens, sem necessidade de pontos de controle.

Duas técnicas de posicionamento diferencial são predominantes para este fim: (1) RTK (*Real Time Kinematics*), que requer uma estação base fixa ligada via rádio com a unidade móvel, embarcada no RPAs, que é corrigida em tempo real; e (2) PPK (*Post Processing Kinematics*), em que os dados GNSS, da base e do receptor móvel, são gravados para processamento posterior, em escritório. Estas mesmas técnicas podem ser realizadas para os dados GNSS obtidos na coleta de pontos de apoio.

Figura 33 – Coleta de pontos de apoio utilizando alvos por sistema de posicionamento global GNSS, método diferencial. Fonte: fotografias tiradas pelo autor.

5.1.7.4 Planejamento de Missões de SfM-MVS com RPA

O planejamento inicia pela delimitação da área de interesse, de acordo com o escopo do projeto, e considerando o sistema RPA. Em seguida, é feita a análise do terreno da área de interesse de modo a aperfeiçoar a aquisição das fotografias e dos pontos de controle do terreno, se necessários, considerando aspectos de segurança, e conhecer os possíveis pontos de decolagem e aterrissagem, assim como dos acessos à área.

O planejamento do voo é realizado por meio de *software* em computadores portáteis, ou, em aplicativos de dispositivos móveis (Tabela 12). A partir da entrada de alguns parâmetros básicos de voo como a área de interesse, direção e altura de voo, ângulo do sensor e taxa de sobreposição são mostradas automaticamente estimativas de tempo de voo, de número de baterias necessárias, número de imagens, resolução e das linhas de voo. Este planejamento pode ser configurado e salvo em escritório para utilização no dia programado de aquisição.

A orientação das linhas de voo pode seguir qualquer direção, desde que observadas às condições do terreno e ambientais. A altura do voo depende da

resolução (GSD) de projeto. O ângulo do sensor é aquele em que as imagens serão obtidas em *nadir*, ou ligeiramente *off-nadir*, e as taxas de sobreposição são as adequadas ao tipo de terreno e às técnicas de reconstrução SfM-MVS.

A operação do RPA depende das condições ambientais, meteorológicas, de um *check-list* pré-voo e configuração do RPA, sendo precedida pela aquisição de pontos de apoio (em caso de aplicação por georreferenciamento indireto).

Para fotografias em *nadir*, a hora ideal para a coleta de imagens compreende a posição do Sol entre 30° e 52° acima do horizonte, o que corresponde a cerca de duas horas antes e depois do meio dia, uma vez que uma inclinação abaixo de 30° não fornece iluminação suficiente do terreno, o que pode provocar a subexposição das fotografias, grandes sombras de objetos e dificuldade de interpretação das fotografias, ou utilização nos processos fotogramétricos. Ângulos maiores que 52° podem resultar em pequenas áreas com reflexão especular (*hotspots*), gerando pontos muito claros e perda de informações nas fotografias (Jensen, 2009).

Na aerofotogrametria digital SfM-MVS as plataformas aéreas não tripuladas realizam voos em alturas baixas (*close range*), fazendo com que os efeitos indesejados de espalhamento da luz solar provocados por vapor d'água e poluição no campo de visada da câmera aeroportada sejam minimizados.

Tabela 12 – Principais aplicativos para dispositivos móveis para mapeamento aéreo: planejamento e controle automático.

Aplicativos	Sistema Operacional		Download Gratuito	Tipo de RPA		Baterias ²	Mapa offline	Terreno ³	Shape ⁴
	iOS	Android		Asa fixa	Asa rotativa				
DJI GS Pro	✓	-	✓	-	✓	✓	cache	-	✓
Pix4D Capture	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	android
Drone Deploy ¹	✓	✓	✓	-	✓	manual	✓	-	✓
Precision Flight	✓	✓	✓	-	✓	manual	✓	-	-
SkyDrones	✓	✓	✓	-	✓	-	-	-	-
Drone Harmony	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓
MapPilot ¹	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓

¹ permitem obter módulos de planejamento e controle mediante compra interna no aplicativo

² permitem que sejam utilizadas diversas baterias para uma única missão de forma automática

³ módulo que permite o RPA voar a uma altitude relativamente constante sobre o solo

⁴ permite que a área de mapeamento seja inserida via *shapefile*, KMZ ou KML externo

Fonte: dados das empresas desenvolvedoras em julho de 2018.

Entretanto, é necessário observar se partículas e a umidade relativa do ar não estão suficientemente adensados a ponto de causar a diminuição da energia captada pelo sensor e gerar a perda de qualidade das fotografias. Para Jensen (2009), o momento ideal de voo é alguns dias após a passagem de um sistema frontal que retira vapor d'água e poluição, com a diminuição do vento. Outras condições ambientais devem ser observadas, como ventos fortes que podem provocar alterações nas linhas de voo e sobreposição e sombras de nuvens, que podem obscurecer partes das fotografias e causar interpretações errôneas.

Durante a operação do RPA, o controle e monitoramento do voo é realizado com os mesmos programas e aplicativos, que permitem a observação em tempo real da altura, velocidade, distância, situação das baterias e das imagens obtidas.

5.2 *Light Detection and Ranging – LiDAR*

O LiDAR, acrônimo de *Light Detection And Ranging*, é uma técnica originada na década de 1960 utilizada para obter dados geométricos detalhados de forma rápida e precisa através da geração de nuvens de pontos 3D georreferenciadas. Os escâneres laser medem a distância e os ângulos entre o equipamento e o alvo imageado (Figura 34-A), para computar as posições no espaço pela detecção do sinal de retorno proveniente da reflexão no terreno de um feixe de luz emitido, semelhante às estações totais, com alta precisão (Lato et al., 2015a; Vanneschi et al., 2017).

Uma característica importante é a capacidade de separação da vegetação e superfície do terreno por técnicas de processamento do primeiro e último sinal de retorno (os retornos múltiplos de um único disparo *laser*), permitindo separar dados precisos relativos à superfície do terreno (Figura 34-B).

As plataformas convencionais para utilização do LiDAR são as terrestre (fixa – LT ou móvel – LM) e aérea (LA). O LT é também conhecido por *Terrestrial LiDAR Scanning* (TLS), ou ainda como laser baseado em solo (*ground-based LiDAR*). Consiste em um equipamento de laser posicionado em um tripé com linha de visada até o alvo, dependente de seu alcance (até 3.000m). Seus dados podem ser integrados a fotografias para produção de nuvens de pontos coloridas. Por sua característica inerente, múltiplas aquisições com recobrimento para referenciamento entre si são necessárias para minimizar oclusões e sombras nos dados. Esta tecnologia não é a mais adequada para imagear através de vegetação, sendo recomendada para encostas expostas (Lato et al., 2015a).

Com o desenvolvimento do *Inertial Measurement Unit* ou Unidade de Medidas Inerciais (do inglês, IMU), foi possível acoplar o LiDAR a plataformas móveis, sendo comuns os veículos (do inglês, *Mobile LiDAR*) e a plataformas aéreas, como aeronaves tripuladas (aeroplanos e helicópteros) e, recentemente, RPAs.

O LA é também conhecido como *Airborne LiDAR (laser) Scanning (ALS)* quando a plataforma utilizada é área, como helicópteros (asa rotativa) e aeronaves de asa fixa (aeroplanos). A aquisição de dados é feita com visada *nadir*, dependente da altura de voo (150 a 3.000m) e da plataforma utilizada, por seguir um plano de voo ao longo da área de interesse. O LA permite a obtenção de modelos do terreno (*bare earth surface*) pela filtragem da vegetação. Escarpas, paredões rochosos, cortes no terreno e feições subverticais podem ser omitidas dos dados por sua característica de aquisição vertical (Lato et al., 2015a).

Figura 34 – LiDAR aéreo: (A) Esquema LiDAR com a unidade laser aeroportada, padrão de perfilamento no solo, posicionamento da aeronave e sistemas de medição. Fonte: modificado de Webster et al. (2004). (B) Os retornos múltiplos de um disparo laser individual.

5.3 Aplicação das Técnicas de Aquisição de Dados 3D

Nas geociências os produtos gerados pelas técnicas mencionadas, por meio de quaisquer plataformas, abarcam um grande espectro de aplicações, tais como geomorfologia, tectônica, geologia estrutural, geodesia, entre outras (Westoby et al., 2012; Nex e Remondino, 2014; Carrivick et al., 2016). No emprego em encostas e na identificação, mapeamento e monitoramento de diferentes tipos de movimentos de massa: utilizando apenas SfM-MVS (Niethammer et al., 2009; Niethammer et al.,

2010; Tahar et al., 2011; Niethammer et al., 2012; Fernández et al., 2014; Lucieer et al., 2014; Tahar, 2015; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2016; Rossi et al., 2018; Yaprak et al., 2018); LiDAR (Roering et al., 2013), ou em conjunto, podendo, ou não, incluir outras tecnologias (Lato et al., 2015a; Lato et al., 2015b; Warrick et al., 2017).

A SfM-MVS possibilita a aquisição rápida e automática de dados topográficos de alta resolução com qualidade, baixo custo em relação à fotogrametria aérea convencional, aos sistemas diferenciais de precisão, aos LA e LT (que necessitam de técnicos especializados), utilizando unicamente câmeras não métricas e uma estação de trabalho com *software*. As nuvens de pontos densas são similares às obtidas por LA ou LT e podem ser utilizadas na caracterização geomorfológica e para detecção de mudanças topográficas. Além disso, existem pacotes de *software open-source* para processamento das fotografias (Peterson et al., 2015; Micheletti et al., 2015; UNAVCO, 2015; Carrivick et al., 2016).

A correspondência entre pontos requer texturas visualmente distintas nas imagens (pode ser uma dificuldade dependendo dos terrenos imageados e das condições de iluminação). A aquisição e processamento de grandes áreas pode ser um desafio e os dados 3D somente são produzidos em escritório (Carrivick, et al., 2016). Isto pode ser contornado pelo planejamento das coletas.

O LiDAR nas geociências é estabelecido há mais tempo e conta com um arcabouço técnico-científico abrangente em áreas, como o estudo da dinâmica de rios e de inundações, de afloramentos, entre outros. É frequentemente utilizado em investigações de movimentos de massa para identificação e caracterização, mapeamento e monitoramento (Jaboyedoff et al., 2012; Lato et al., 2015b).

Por ser um sensor ativo, é independente da luz do sol e pode ser utilizado a qualquer hora do dia, desde que observada a presença de nuvens (em menor grau também para a SfM-MVS de curta distância). Não necessita de superfície ou objetos com textura, podendo ser empregado em áreas monótonas. Cuidados são necessários para as superfícies com reflexão especular, ou de baixa refletância, como a água (Kraus, 2000). O LA é superior à fotogrametria convencional em áreas florestadas para a obtenção dos pontos do solo, permitido por seus múltiplos retornos após classificação, ou filtragem, das nuvens de pontos (Meng et al., 2010).

Estas técnicas têm sido empregadas no gerenciamento de riscos de encostas naturais e antropizadas, considerando suas capacidades diferentes e suas vantagens e desvantagens (Figura 35). Na avaliação de encostas e taludes apresentam a

possibilidade de uma compreensão da dinâmica dos processos além da inspeção visual pelo mapeamento da orientação de fraturas em rocha e outras propriedades mecânicas, da magnitude e frequência de quedas de blocos, das deformações e erosões e geração de modelos 3D (Lato et al., 2015a).

A coleta de dados em encostas depende do emprego da tecnologia correta (Tabela 13), considerando o objetivo do projeto, conhecimento do terreno e das características de cada uma delas (vantagens e desvantagens). Como exemplo disto, Lato et al. (2015a) apresentam o LT como menos custoso e mais preciso que, porém, pode ser inviável pela falta de locais apropriados para aquisição de dados.

Dependendo das condições topográficas e de vegetação em que cada tecnologia é empregada, a resolução resultante nos dados oferece uma aptidão dentro da análise geoespacial. Estas considerações foram feitas por Lato et al. (2015a) e atualizadas por Vanneschi et al. (2017) (Tabela 14).

Figura 35 – Plataformas de coleta remota de dados 3D utilizadas para mapeamento e monitoramento de maciços. Fonte: modificado de Lato et al., (2015a) e Hutchinson et al., (2015).

A resolução (pontos/m²) dos dados é controlada pela configuração de aquisição e equipamento utilizado. Para o LiDAR o aumento da resolução é proporcional ao aumento do custo e do tempo gasto na aquisição e para a SfM-MVS, é dependente da configuração da câmera (resolução, distância focal, distância entre a câmera e o alvo) e o custo proporcional à melhoria da câmera e plataforma.

O aumento da resolução melhora a identificação de feições de detalhe que podem ser importantes na aplicação para detecção de mudanças em uma encosta por meio de uma série temporal, por exemplo. Por outro lado, impacta no processamento, armazenamento e utilização dos dados. A acurácia dos dados aerofotogramétricos é estritamente dependente da altura de voo e tipo de câmera, enquanto que para LA é ligada à densidade de pontos, que é dependente da altura de voo, velocidade, ângulo de visada e taxa de dados do escâner (Kraus, 2000).

O emprego de RPAs, com LA e FA, por sua popularização, baixo custo, flexibilidade, portabilidade, facilidade de aquisição multitemporal e alta resolução espacial, pode ser uma alternativa ao LT e LA convencional, com menos limitações do que a FT (Al-Rawabdeh et al., 2016; Car et al., 2016).

A utilização de SfM-MVS em séries temporais tem se tornado mais frequente nos últimos anos como pode ser visto pelos trabalhos de Lucieer et al. (2014), Turner et al. (2015), Fernández et al. (2016), Rossi et al. (2018), Yaprak et al. (2018) e Kallimogianis et al. (2019).

Para obtenção de dados relativos à elevação do terreno, sem a presença de artefatos (erros), ou de objetos acima da superfície do terreno, é necessário realizar a filtragem, ou classificação, dos pontos em operações realizadas diretamente nas nuvens de pontos.

Tabela 13 – Considerações topográficas para selecionar o SR 3D mais adequado ao projeto.

	LT	FT	FAO	LA	FA
Encostas de alta declividade com vegetação limitada	✓	✓	✓	-	✓
Encostas de média declividade com vegetação limitada	✓	✓	✓	✓	✓
Encostas de baixa declividade (independente da vegetação)	-	-	-	✓	✓
Encostas cobertas por vegetação	-	-	-	✓	-
Encostas altamente declivosas fora do alcance do LT e FT	-	-	✓	-	-

LT = laser terrestre, FT = fotogrametria terrestre, FAO = fotogrametria/fotografia aérea oblíqua, LA = laser aéreo, FA = fotogrametria aérea. Fonte: modificado de Lato et al. (2015a) para considerar FA e LA por RPAs.

Tabela 14 – Resolução de dados requeridos para tarefas de análise de dados 3D a as tecnologias associadas e recomendadas para coleta de dados.

Análise de dados 3D	Resolução (pts/m ²)	LT	FT	Fotogrametria com RPA de asa rotativa	Fotogrametria com RPA de asa fixa	LA
Mapear falhas regionais e feições do terreno	5	-	-	-	✓	✓
Mapear fraturas > 5m (vegetação)	20	-	-	-	-	✓
Mapear fraturas > 5m	20	✓	✓	✓	✓	✓
Mapear fraturas > 1m	100	✓	✓	✓	✓	-
Mapear fraturas > 0,5m	500	✓	✓	✓	✓	-
Mapear fraturas > 0,1m	1000	✓	✓	✓	-	-
Mapear mudanças em encostas > 1m ³ (veg.)	20	-	-	-	-	✓
Mapear mudanças em encostas > 1m ³	20	✓	✓	✓	✓	✓
Mapear mudanças em encostas > 0,25m ³	100	✓	✓	✓	✓	-
Mapear mudanças em encostas > 0,1m ³	500	✓	✓	✓	-	-

LT = laser terrestre, FT = fotogrametria terrestre, LA = laser aéreo. Fonte: traduzido pelo autor e modificado de Vanneschi et al. (2017) para considerar FA por RPAs.

5.4 Filtragem e Classificação de Nuvens de Pontos

A filtragem, ou classificação, de nuvens de pontos é etapa fundamental em qualquer aplicação dos dados 3D, incluindo detecção de mudanças topográficas e a geração de modelos digitais (Meng et al., 2010). Apesar de não haver consenso entre os trabalhos consultados, usualmente, o termo filtragem incorre na remoção de pontos, incluindo *outliers* e erros sistemáticos, etapa essencial para as demais subsequentes que se fizerem necessárias, e na remoção dos pontos relativos aos objetos acima da superfície. Por sua vez o termo classificação apenas separa em classes distintas os retornos relativos ao solo (*ground*) e não solo (*non-ground*), preservando a nuvem de pontos inteira. A discussão a seguir se refere apenas à separação dos pontos de solo e não solo, independente dos termos.

Visando a reconstrução de modelos digitais de terreno, utilizando dados LiDAR, vários algoritmos para filtragem de nuvens de pontos foram desenvolvidos nos últimos anos (Kraus e Pfeifer, 1998; Axelsson, 2000; Vosselman, 2000; Zhang et al., 2003; Streutker e Glenn, 2006; Evans e Hudak, 2007; Zhang et al., 2016).

A maioria dos algoritmos tem sido continuamente aprimorada para minimizar suas dificuldades em extrair os pontos do terreno. O processo fundamental e inicial

de classificação de nuvem de pontos começa com a separação dos pontos da superfície do terreno dos pontos de objetos, tais como estruturas e vegetação, localizados acima do terreno. Tarefa difícil, ainda mais para terrenos complexos ou declivosos (Evans e Hudak, 2007; Zhang et al., 2016).

Cada algoritmo utiliza uma estratégia, tendo vantagens e desvantagens, na aplicação nos diferentes ambientes. Podem ser baseados em morfologia (declividade do terreno), superfície, agrupamento ou segmentação e em blocos mínimos. Os mais utilizados são os baseados em superfície, onde uma superfície que se aproxima do terreno é simulada, e também apresentam um melhor desempenho na classificação das nuvens de pontos (Sithole e Vosselman, 2004). Estes algoritmos ainda podem ser divididos em filtros baseados em morfologia, interpolação iterativa e densificação progressiva (Nie et al., 2017).

As classificações são dependentes da densidade de pontos, do registro de múltiplos retornos e da intensidade. Os múltiplos retornos são importantes para estabelecer os pontos de solo e de objetos. A intensidade retorna informações radiométricas de cada ponto, podendo ser utilizada em algoritmos de classificação (Axelsson, 2000).

Breve descrição de alguns dos principais algoritmos: (a) *Weighted Least Squares* (WLS) ou *Interpolation-based Filter* (IBF), filtro baseado em uma superfície criada por interpolação linear e ponderada por mínimos quadrados (Kraus e Pfeifer, 1998); (b) *Adaptive Triangular Irregular Network* (ATIN) ou *Progressive TIN* (PTIN), ou filtro baseado em superfície formada por uma rede irregular triangular. A estratégia deste algoritmo é de gerar uma superfície TIN esparsa e progressivamente densificá-la classificando os pontos no processo (Axelsson, 2000); (c) *Slope Based Filter* (SBF) ou filtro baseado em declividades, tem por abordagem a comparação das declividades entre um ponto de referência e seus vizinhos, assim, classificando os pontos de terreno (Vosselman, 2000); (d) *Progressive Morphological Filter* (PMF), ou filtro morfológico progressivo, em que uma janela gradual e crescente e limiares na diferença entre as elevações presentes são utilizados na filtragem da nuvem de pontos. O algoritmo assume a declividade do processamento como constante (Zhang et al., 2003); (e) *Boise Centre for Aerospace Laboratory LiDAR Algorithm* (BCAL) é um algoritmo de classificação em malha para identificação da menor elevação, subindo para o topo dos dados, interpolando superfícies e classificando os pontos, desenvolvido especificamente para um tipo de vegetação (Streutker e Glenn, 2006);

(f) *Multiscale Curvature Classification* (MCC) é um filtro baseado em interpolação de superfícies em múltiplas escalas para classificação de pontos relativos ao solo abaixo e acima da superfície simulada (Evans e Hudak, 2007) e (g) *Cloth Simulation Filter* (CSF), ou filtro de simulação de tecido, é baseado em uma simulação de tecido, simples, cujo procedimento é inverter a nuvem de pontos com a colocação do tecido virtual apoiado nos pontos (representando o MDT), com controle de suas características por entrada de parâmetros simples, extraindo os pontos relativos ao solo (Zhang et al., 2016).

Diversas comparações foram realizadas entre diferentes filtros para analisar as performances em determinados ambientes utilizando dados LiDAR (Zhang e Whitman, 2005; Meng et al., 2010; Tinkham et al., 2011; Montealegre et al., 2015; Silva et al., 2018; Zhao et al., 2018). No geral, os algoritmos têm tendência a apresentar erros maiores com o aumento da declividade do terreno e, quando menor que 20%, ou maior que 80%, da cobertura vegetal. O aumento da variação de elevação dos dados também aumenta o erro total. Assim, os aspectos ambientais afetam o desempenho da filtragem dos algoritmos.

Resultados podem ser aprimorados com a escolha apropriada do algoritmo. Uma análise dos trabalhos mencionados, para dados LIDAR, aponta que em ambientes complexos, com cobertura vegetal e em terrenos declivosos o MCC apresenta o melhor desempenho (Zhao et al., 2018; Silva et al., 2018; Montealegre et al., 2015), mantendo detalhes topográficos, apesar de depender da densidade de pontos. O MCC apresenta pior desempenho em relação ao BCAL para áreas densamente vegetadas, contínuas, planas, ou com vegetação de elevação contínua.

Com pequenas divergências, em um cenário declivoso e menos vegetado (cobertura menor que 60%), o algoritmo WLS/IBF é também recomendado para filtrar LIDAR aéreo, desde que aplicado em superfícies contínuas e livres de descontinuidades (edificações, p. ex.), apresentando comparativamente menor número de erros de classificação de pontos (*ground* e *non-ground*) e menor influência por mudanças de declividade do terreno. Neste mesmo cenário o MCC é também recomendado, com desempenho semelhante (Axelsson, 2000; Tinkham et al., 2011; Silva et al., 2018; Zhao et al., 2018).

Para dados menos densos, o PTIN/ATIN, é mais confiável (Zhao et al., 2018) e comparável ao MCC (Montealegre et al., 2015). Polat e Uysal (2015) concluíram que PTIN/ATIN, quando comparado a outros algoritmos como o SBF e o PMF, tem

desempenho melhor em áreas rurais. Para terrenos complexos e vegetados PTIN/ATIN pode introduzir distorções na morfologia da superfície, resultando em erros maiores e adicionando ruído (Evans e Hudak, 2007).

Os valores de entrada do PMF são constantes em toda a área a ser filtrada dificultando a detecção de pontos *ground* em quebras de declividade e em terrenos íngremes. O SBF é baseado em morfologia de superfície, tendo sido aprimorado por outros autores para melhorar seu desempenho, no entanto, mesmo estes não respondem bem a terrenos complexos uma vez que a precisão da filtragem diminui com o aumento da declividade do terreno (Zhang et al., 2016).

A tarefa mais dispendiosa no processamento de nuvens de pontos é assegurar sua qualidade em derivar informação e sua filtragem (Carrivick et al., 2016). Dados 3D SfM-MVS por RPAs são aplicáveis, em geral, para áreas com pouca ou nenhuma vegetação uma vez que dependem das fotografias e das condições de iluminação. No entanto, algoritmos também foram aplicados para estas nuvens densas a despeito do desafio de se obter os pontos de solo em locais com vegetação, ou com objetos acima do solo (Jensen e Matthews, 2016; Simpson et al., 2016; Asghar, 2017; Meng et al., 2017; Serifoglu Yilmaz et al., 2017; Polat e Uysal, 2017; Serifoglu Yilmaz et al., 2018; Serifoglu Yilmaz e Gungor, 2018; Zhang et al., 2018; Zeybek e Sanlioglu, 2019).

Em geral, os algoritmos desenvolvidos em LiDAR aplicados a dados SfM-MVS não apresentam bons resultados em áreas cobertas por vegetação pela dificuldade de se obter pontos do terreno, com os erros aumentando na medida que a vegetação é mais densa. Parte disso decorre do movimento da vegetação durante a aquisição das imagens, da complexidade de sua estrutura (Carravick et al., 2016). Em detrimento desta generalidade, o algoritmo CSF apresenta bons resultados em áreas planas, por sua estratégia de filtragem, com bom desempenho em termos de erros totais em áreas vegetadas declivosas, comparativamente ao PTIN/ATIN. O MCC também é um dos algoritmos menos afetado por vegetação em terrenos declivosos e o ATIN/PTIN apresentou bons resultados para áreas vegetadas planas (Asghar, 2017; Meng et al., 2017; Serifoglu Yilmaz et al., 2017).

Estratégias para filtrar nuvens SfM-MVS, como filtragem por blocos mínimos seguida de densificação TIN (Jensen e Matthews, 2016) e a utilização do ATIN/PTIN, aprimorado no *software* LAsTools (Simpson et al., 2016), são baseadas em pontos em áreas com cobertura vegetal esparsa, planas, ou com vegetação fragmentada com erros altos reportados para vegetação densa nos MDTs gerados.

A integração de tecnologias, como GNSS, RPAs e algoritmos de *machine learning* apresentaram bons resultados nas filtrações de nuvens SfM-MVS em áreas densamente vegetadas em cenário complexo, como o costeiro, abrindo novas possibilidades de aplicação, porém em um processo longo, interativo, apenas parcialmente automatizado (Meng et al., 2017).

Para a detecção de mudanças topográfica é fundamental a minimização dos efeitos de vegetação e de eventuais objetos acima do terreno para utilizar os dados 3D nas análises (Jensen e Matthews, 2016).

O desenvolvimento recente dos algoritmos, especificamente para LiDAR, tem considerado as características dos terrenos automaticamente para mitigação de erros relacionados à configuração dos parâmetros pelo usuário (Wan et al., 2018).

A despeito dos filtros e de seu desenvolvimento Carravick et al. (2016) consideram que a filtração manual, considerando a remoção de pontos espúrios, pode ser uma abordagem tão rigorosa quanto a utilização de métodos automáticos, com a liberdade de deixar, ou remover, pontos conforme a necessidade.

A filtração de nuvens SfM-MVS pode ser facilitada em caso de nuvens ou superfícies de referência associados ao terreno, desde que em resolução e precisão compatível, pelo cálculo das distâncias entre a nuvem, ou superfície, de referência e as nuvens não filtradas, com posterior filtração baseada nestas distâncias.

5.5 Detecção de Mudanças

Singh (1989) define a detecção de mudanças (*change detection*) como o processo de identificação de diferenças no estado de um objeto, ou fenômeno, pela observação em diferentes tempos e quantificação de seus efeitos. Assim, é necessário realizar o registro das imagens, modelos digitais, ou dados 3D, por meio de uma transformação espacial, para alinhá-los, podendo ser realizado para diferentes aquisições, pontos de visada ou sensores (Crósta, 1992; Al-Rawabdeh et al., 2016).

A detecção de mudanças é utilizada em diferentes aplicações e escalas, tais como análise do uso do solo, avaliação de danos e monitoramento de desastres. Para monitoramento, ou análise, de movimentos de massa são identificados mudanças e deslocamentos da superfície do terreno (Singh, 1989).

Singh (1989) ressalta diversas vezes, em seu trabalho, que o sucesso da detecção de mudanças depende da precisão do registro entre os dados, considerando um procedimento crítico. Técnicas convencionais de detecção de mudanças baseada

em análise de imagens (Singh, 1989) não são adequadas na fotogrametria SfM-MVS, por questões de iluminação das cenas. Assim, a análise deve ser realizada por meio das nuvens de pontos, ou por produtos derivados destas.

A utilização de dados 3D, de LiDAR e fotogrametria SfM-MVS, para analisar evolução e mudança em superfícies naturais por comparação entre nuvens de pontos têm se tornado mais frequente, com as seguintes abordagens para detecção de mudanças: (1) comparação entre MDEs gerados para cada aquisição (2) rastreamento 3D de partes, ou elementos, correspondentes nas nuvens de pontos para calcular campos de deslocamento, (3) cálculo das distâncias entre nuvens de pontos, quando partes homólogas não podem ser definidas.

Esta última é comum para casos de superfícies naturais alteradas entre as aquisições de dados (por erosão, sedimentação, vegetação, entre outros) e também quando as nuvens de pontos não se sobrepõem precisamente para uma comparação ponto a ponto (Lague et al., 2013; Barnhart e Crosby, 2013).

Os métodos existentes para calcular distâncias, descartando aqueles que utilizam apenas a diferença entre MDEs (DoD, *DEM of Difference*), são baseados na (a) menor distância simples entre pontos utilizando, por exemplo, a estatística dos vizinhos mais próximos (C2C, *Cloud to Cloud*), ou por modelagem de superfície local (C2C-HM, *Cloud to Cloud Height Model*), (b) na distância entre modelo, ou superfície reconstruída, e nuvem de pontos (C2M, *Cloud to Model/Mesh*), com limitações em caso de superfícies rugosas em todas as escalas, e (c) na comparação direta 3D entre as nuvens de pontos (M3C2, *Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) (Lague et al., 2013). A seguir serão descritos estes métodos:

C2C e C2C-HM: as distâncias C2C são calculadas diretamente entre duas nuvens de pontos com o método padrão de correspondência de pontos de vizinhos mais próximos (Figura 36-A). Quando a nuvem de referência não é suficientemente densa estas medidas podem não ser precisas (Figura 36-B), o que pode ser mitigado por uma modelagem local (Figura 36-C) onde, para cada ponto da nuvem comparada, o ponto mais próximo na referência é encontrado, gerando uma superfície local. Estas medidas obtidas superam as limitações da DoD, porém, ainda podem gerar medidas não precisas. Os resultados têm os deslocamentos em relação à nuvem de referência, o que dificulta a visualização e interpretação para detecção de mudanças. Estes métodos foram desenvolvidos para detecção de mudanças rápidas (Girardeau-Montault et al., 2005; Lague et al., 2013).

Figura 36 – Distâncias C2C e C2C-HM: (A) comparação entre nuvem referência e nuvem comparada e a diferença entre a diferença entre as distâncias medida e verdadeira, (B) utilizando a estatística de vizinhos mais próximos e (C) utilizando modelagem local para melhorar a distância medida.

C2M: as distâncias C2M são calculadas entre uma nuvem de pontos comparada e uma superfície modelada de referência (Figura 37-A). Para cada um dos pontos realiza-se uma busca pelo triângulo modelado mais próximo e mede-se a distância, relativa a esta superfície. A geração de superfícies 3D é uma tarefa complexa, com retrabalho manual, uma vez que requer interpolação (dependente de algoritmos), consome tempo e os dados sofrem uma transformação de 3D para 2,5D (Lague et al., 2013; Barnhart e Crosby, 2013).

M3C2: algoritmo que permite a comparação entre duas nuvens de pontos com distâncias assinaladas e outros produtos, facilitando a detecção de mudanças, dividido em: (1) estimativa e orientação das normais à superfície em uma escala consistente com a rugosidade da superfície local; (2) medida da distância média entre superfícies ao longo da normal com cálculo de intervalo de confiança (limite de detecção), que considera as rugosidades (Figura 37-B) (Lague et al., 2013).

O algoritmo aceita que nuvens sejam reamostradas formando pontos núcleo (*core points*) i , para otimizar os cálculos das normais e distâncias. Para cada i , os pontos vizinhos com um raio de $D/2$ são usados para interpolar um plano por melhor ajuste. D é a escala para o cálculo das normais, definido por usuário de acordo com a cena analisada, densidade de pontos e rugosidade (Lague et al., 2013). Um cilindro com eixo paralelo à normal, para um ponto núcleo, é projetado até as nuvens de pontos. O cilindro de raio $d/2$, onde d é a escala de projeção, com comprimento máximo definido para limitar a intensidade computacional. Os pontos, de ambas as nuvens, inseridos no cilindro são usados para calcular posições médias das superfícies respectivas, i_1 e i_2 .

Figura 37 – (A) Comparação C2M entre modelo e nuvem comparada. (B) Método M3C2: (1) escala para cálculo da normal D (ilustrado na nuvem 1) e (2) escala para a projeção do cilindro d , paralelo à normal, para cada ponto núcleo i , interceptando as nuvens. O comprimento do cilindro corresponde à máxima distância de busca por pontos para calcular a posição média das superfícies, i_1 e i_2 , utilizadas no cálculo da distância entre nuvens. O nível de confiança local utiliza o tamanho e rugosidade local das nuvens inseridas no cilindro. (C) Metodologia M3C2-PM para detecção de mudanças com dados SfM utilizando mapas de precisão para aprimorar o nível de confiança local. Fonte: Barnhart e Crosby (2013); Lague et al. (2013); James et al. (2017b).

A distância medida entre i_1 e i_2 é atribuída ao ponto núcleo i e são calculadas ao longo da normal a rugosidade local σ_1 em i_1 (nuvem 1), e a rugosidade aparente σ_2 em i_2 (nuvem 2). As rugosidades e o erro de registro, em um sistema de coordenadas comum, determinam o intervalo de confiança da detecção de mudança para cada ponto núcleo i (Lague et al., 2013).

A escolha da escala para cálculo da normal é central no M3C2: o D ideal depende do objeto de análise na comparação, do espaçamento entre pontos e da geometria da superfície, podendo ser também configurada automaticamente em um intervalo definido. Para a escala d é recomendado que sejam englobados pelos menos 20 pontos, dependendo da densidade e complexidade da superfície.

Uma comparação realizada entre M3C2, C2M e C2C demonstrou um nível de precisão maior de M3C2 e um fluxo de trabalho mais eficiente por não utilizar a reconstrução de superfícies. Exemplos de utilização do M3C2 para detecção de mudanças de movimentos de massa com sucesso incluem Lague et al. (2013), Asghar (2017), Warrick et al. (2017).

O erro total ao realizar detecção de mudanças por comparação entre nuvens é dado pela soma da incerteza da posição dos pontos (dependente da técnica de aquisição dos dados e das características dos sensores), do erro do registro entre as nuvens (dependente do método de registro e da distribuição dos pontos de controle para referenciá-las) e da rugosidade da superfície (Lague et al., 2013).

A precisão das medidas no M3C2 (relacionada às rugosidades locais de cada nuvem), é conveniente para dados LiDAR, base do desenvolvimento do algoritmo, porém, não para dados SfM-MVS, que têm filtragens internas próprias à obtenção dos pontos e de seu georreferenciamento (dependente das características de cada aquisição: posição das imagens, pontos de apoio e pontos homólogos). A precisão das medidas SfM-MVS é melhor obtida pelo uso de mapas de precisão 3D (derivados de estimativas de precisão fotogramétrica em X, Y e Z), com análise da incerteza espacial de cada aquisição e por pares de ponto i_1 e i_2 , incorporando no M3C2, ao longo das normais locais existentes, para definição do intervalo de confiança (limite de detecção) na detecção de mudanças (M3C2-PM, *Precision Map*) utilizando nuvens densas SfM-MVS (Figura 37-C) (James et al., 2017b).

O limite de detecção de mudanças para cada uma das tecnologias abordadas (LiDAR, ou SfM-MVS) é baseado no valor máximo possível de precisão local, podendo chegar a milímetros (Lague et al., 2013). É inerente aos dados, às técnicas de obtenção e à reconstrução da geometria 3D, de forma que os LT e FT são considerados os mais precisos, seguidos por FAO, LA e FA por RPA (Lato et al., 2015a). Com o desenvolvimento das tecnologias nos RPAs existe a tendência da obtenção de dados precisos com esta plataforma, como LA por RPA. Al-Rawabdeh et al. (2016) consideram que o uso de RPAs e FA para detecção de mudanças de superfície topográfica por de movimentos de massa é comprovado apesar de ainda pouco explorado.

Na fotogrametria SfM-MVS é comum que as nuvens sejam referenciadas pelos metadados EXIF (dependente da qualidade do sistema embarcado), ou, de modo indireto utilizando alvos e pontos de apoio. O posicionamento em relação ao mundo real por meio de um sistema de coordenadas, e avaliado por meio da estatística de RMSE dos pontos de verificação, faz com que as nuvens tenham escalas e outros parâmetros posicionais semelhantes, o que facilita o registro entre elas.

Caso no momento do registro entre nuvens estas informações de posicionamento não sejam utilizadas, cada uma das nuvens será gerada em um sistema de coordenadas arbitrário, com escalas diferentes, dificultando o processo de registro. Os pontos de uma nuvem são distribuídos irregularmente e de difícil identificação, assim podendo embutir erros ao serem utilizados sozinhos no registro, requerendo uma etapa adicional de registro fino (algoritmos) (Lato et al., 2015a).

O método ICP (*Iterative Closest Point*) e suas variações tentam minimizar as diferenças entre nuvens de pontos, sendo os mais comuns empregados no registro. São necessárias grandes áreas de sobreposição e parâmetros iniciais de qualidade para que se tenham resultados satisfatórios, dependendo de uma abordagem manual para prover correspondências antes da etapa de registro fino. Para cenários naturais este método não resulta em registro de alta precisão (< 1 cm) (Micheletti et al., 2015; Lague et al., 2013; Al-Rawabdeh et al., 2016).

O registro baseado em alvos, fixos ou não, requer equipamentos específicos, tempo, esforço humano para sua instalação e coleta de posição. Os alvos fixos devem ser instalados em áreas estáveis, requerendo conhecimento prévio das áreas de instabilidade da encosta, para que sejam visíveis durante todas as coletas de dados e próximos às extremidades da área de interesse para otimizar sua instalação. A instalação em uma região instável pode se tornar inviável, limitada e potencialmente perigosa (Al-Rawabdeh et al., 2016).

O georreferenciamento direto, baseado em dados precisos de posicionamento das câmeras (posição da câmera onde cada imagem foi obtida), é empregado em dados obtidos por LA e LT e, mais recentemente, em RPAs. Este método implica na redução, ou até mesmo na eliminação, da instalação de pontos de apoio, tornando-se atrativo para regiões de difícil acesso, ou, em projetos de orçamento limitado por reduzir custos no mapeamento, apesar do alto valor inicial dos equipamentos. A determinação da orientação e posição absolutas das câmeras estabelece um alinhamento entre as nuvens de pontos minimizando o erro de registro (Al-Rawabdeh et al., 2016; James et al., 2017b).

6. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho foram enumerados em itens específicos.

6.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se a noroeste da cidade de São Paulo (Figura 38-A), distrito de Anhanguera, nos bairros Itaberaba I, II e Jardim Jaraguá, na encosta NE do Morro Doce, conhecido também como Morro de Jesus, de alta suscetibilidade a movimentos de massa, de grande amplitude, alta declividade e relevo de tipo serrano, apresentando movimentos de massa registrados na Defesa Civil Distrital de Perus-Anhanguera. O acesso pode ser realizado pela Rodovia Anhanguera (SP-330) e Rodoanel Mário Covas (SP-21), Oeste, além das vias de acesso local, Rua Iturama (Itaberaba II) e Rua Francisco Bellazzi (Jardim Jaraguá), e trilhas para caminhada partindo destas ruas. (Figura 38-B).

Figura 38 – Localização (A) da área de estudo. Fonte: Google Earth; CPRM e IPT (2014). (B) Vertente do Morro Doce com destaque para a região com movimentos de massa. Fonte: tirada pelo autor.

6.2 Geologia Regional

Considerando a ocorrência de ouro no Pico do Jaraguá e Serra do Morro Doce como a pioneira no Brasil e estudada do ponto de vista geológico (ca. 1560), com as escavações de sua prospecção e lavra consideradas antigas em 1822, a geologia da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é estudada há pelo menos dois séculos (Coutinho, 1972; Carneiro, 2002; Carneiro et al., 2011; Neves da Silva et al., 2011). Assim, muitas hipóteses e revisões foram realizadas, tais como Hasui et al., (1976), Carneiro et al., (1985), Dantas (1990).

A revisão não focou na discussão estratigráfica e tectônica das unidades ocorrentes a N-NW de São Paulo (SP), apesar da importância no desenvolvimento do conhecimento geológico, mas em suas descrições e tipos litológicos, resumidamente. Para uma revisão abrangente: Henrique-Pinto (2012), Henrique-Pinto et al., (2014), Henrique-Pinto et al., (2015a) e Henrique-Pinto et al., (2015b).

Os terrenos do embasamento da RMSP (Figura 39) foram justapostos por processos tectônicos, deformacionais e metamórficos, em uma evolução policíclica, vinculados à Província Estrutural Mantiqueira (Neoproterozoico-Cambriano), da Faixa de Dobramentos Ribeira Central, que geraram as zonas de cisalhamento de orientação ENE-WSW. É composto pelo Terreno Apiaí, domínios Apiaí (Grupo Açungui) e São Roque-Serra do Itaberaba (Grupo São Roque e Grupo Serra do Itaberaba), e pelo Terreno Embu (Domínio Embu, Complexo Embu) (Juliani et al., 2014; Henrique-Pinto et al., 2015b).

O Domínio São Roque-Serra do Itaberaba (DSR) é um bloco tectônico limitado ao norte por rochas da *Nappe* de Socorro-Guaxupé, trecho sul da Faixa Brasília (orógeno Brasília), e pela Zona de Cisalhamento (ZC) de Itu-Jundiuvira. Ao sul é limitado por ZC, que na RMSP, é a de Taxaquara-Rio Jaguari, separando DSR do Domínio Apiaí. Ao sul o Apiaí é limitado pela ZC Caucaia do Alto, do Domínio Embu, relacionado à Faixa Ribeira. Para alguns autores, o Domínio São Roque é relacionado ao Domínio Socorro-Guaxupé, formando arco magmático nas margens do Cráton Paranapanema, recoberto pela Bacia Sedimentar do Paraná (Heilbron et al., 2004; Henrique-Pinto, 2012; Henrique-Pinto et al., 2014; Juliani et al., 2014).

Figura 39 – Mapa geológico regional: 1. Sedimentos; 2. Granitos; 3. Domínio Socorro-Guaxupé; 4. Domínio Embu; 5. Domínio Apiaí-São Roque: grupos Açungui e São Roque; 6. Grupo Serra do Itaberaba; 7. Área de estudo. Fonte: modificado de Henrique-Pinto et al. (2014).

O DSR é composto por Grupo São Roque (GSR) e Grupo Serra do Itaberaba (GSI) (Juliani et al., 1998; Juliani et al., 2014). O GSI é composto por metassedimentos mesoproterozoicos caracterizados por rochas metabásicas, com afinidades de fundo oceânico, na base, gradando para rochas metavulcânicas andesíticas e riolíticas, no topo, de ambiente de arco de ilhas, entremeados de metatufos, séries clasto-químicas, metapelitos e metapsamitos imaturos e o GSR por rochas metavulcanossedimentares neoproterozóicas, discordante sobre GSI (Heilbron et al., 2004; Henrique-Pinto, 2012).

A deposição do DSR é acompanhada de magmatismo Neoproterozoico, básico a intermediário, resultante de fusões parciais, lavas basálticas andesíticas e sills de diabásio, e vulcanoclásticas. As suítes sin a tardi-orogênicas englobam os maciços Cantareira, Mairiporã e Taipas, de composição granodiorítica a monzogranítica. Os granitoides mostram-se em corpos de diversas dimensões, irregulares, com veios pegmatíticos associados (Coutinho, 1972; Carneiro et al., 1985; Dantas, 1990).

No Morro do Polvilho, idade U-Pb em zircões dos metarcósios limita a sedimentação do GSR a 1,79 Ga. Idade Rb-Sr da matriz dos metaconglomerados, intercalados aos metarcósios, sugere metamorfismo e empurrão do GSR sobre o GSI em 800 Ma. Granitos sin-colisionais de idades de 600 Ma indicam o final da evolução do GSR (Juliani et al., 1998). As rochas sedimentares são vinculadas à Bacia de São Paulo, Terciária, parte do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989), desenvolvidas no Paleogeno sobre a Faixa Ribeira neoproterozoica, núcleos arqueanos e suítes granitoides neoproterozoicas.

As coberturas quaternárias formam depósitos descontínuos colúvio-aluvionares e aluvionares, nos atuais canais de drenagem. Os coluviões são argilo-arenosos, com lentes argilosas a conglomeráticas e aluviões subordinados, de conglomerados basais seguidos de areais grossas a conglomeráticas gradando para areias médias a finas, do Pleistoceno. Os aluviões, com espessuras inferiores a 10m, podem ter cascalheira na base, associados às várzeas e terraços baixos, constituídos de areia e argila ricas em matéria orgânica (Carneiro et al., 1985; Gurgueira, 2013).

6.3 Geologia Local

A N-NW da cidade de São Paulo ocorrem metassedimentos, metassupracrustais, de idade proterozoica, submetidos a deformação ao longo de zonas de cisalhamento e metamorfismo no Neoproterozoico (Figura 40). Fazem parte do GSR, que posteriormente foi dividido em GSI e GSR, por tipos litológicos, graus de metamorfismo e deformações diferentes, indicando que suas evoluções se deram em ciclos geotectônicos diferentes. O GSR é considerado basal, colocado discordantemente sobre o GSI por falhas de empurrão de baixo ângulo (Juliani et al., 1998; Martin, 2000).

O GSI, de idade Mesoproterozoica, é formado de três sequências, sendo elas: **(a)** vulcanossedimentar e basal da Formação Morro da Pedra Preta; **(b)** a clasto-química da Formação Nhanguçu, superior, composta de sedimentos manganesíferos e carbonáticos, constituindo metapelitos com lentes subordinadas de rochas carbonáticas e calciossilicáticas e **(c)** clástica da Formação Pirucaia, predominantemente quartzítica correspondendo a fácies depositada em margens de bacia sedimentar síncrona às anteriores (Juliani e Beljavskis, 1995; Juliani et al., 1998; Martin, 2000).

O GSR, de idade Neoproterozoica, essencialmente clástico, inicialmente dividido em quatro unidades: **(a)** Piragibu, basal, inclusive na Serra do Morro Doce, metapelítica com lentes metaconglomeráticas e metavulcânicas; **(b)** Formação Pirapora do Bom Jesus, vulcânica, vulcanoclástica com cálcio-filitos; **(c)** Formação Estrada dos Romeiros, composta de metapelitos e metarenitos rítmicos, fácies mais distal da Formação Piragibu; **(d)** Formação Boturuna, composta por metarenitos e metarcósios (Juliani e Beljavskis, 1995; Juliani et al., 1998). A sequência basal do GSR é predominantemente sedimentar, metamorfoisado em baixo grau, raramente alcançando a zona da biotita ou da granada, de baixo grau de deformação (Juliani et

al., 1998). Compreende a Formação Morro Doce, dividida em duas unidades, a metarcosiana e a metaconglomerática (Martin, 2000), sequência inferior (Dantas, 1990), ou unidade metapsamítica impura (Carneiro, 1983).

A unidade metarcosiana tem predominância de metarcósios de coloração cinza a cinza-esverdeados, maciços a foliados, com porfiroclastos de feldspatos potássicos e plagioclásio, grânulos e pequenos seixos de quartzo, quartzito e, mais raros, de granitoides. Ocorrem gradações para subarcósios e, de modo subordinado, lentes de metaconglomerados matriz suportados e com clastos mais finos, quartzitos e metarenitos feldspáticos, metarenitos finos, metagrauvas (quartzo-biotita xistos finos com grânulos de feldspatos e quartzo) e filitos. A unidade metaconglomerática é predominantemente formada de metaconglomerados polimíticos orientados a miloníticos com matriz cinza-escura e ricos em seixos e calhaus.

Os metaconglomerados têm espessura de ca. 500m, de direção noroeste, dobrada e espessada em seu ápice. Os clastos predominantes, em cerca de 80 a 90%, são os de granitoides foliados ou não (monzogranitos e leucogranitos), pegmatitos, quartzitos, quartzo de veio, e clastos de feldspatos por vezes com as fases preservadas. Menos comuns ocorrem clastos de xistos, de rochas metabásicas e de rochas de tendência andesítica, e calhaus com faces planas sugestivos de retrabalhamento de depósitos glaciais em leques aluviais. Ocorre com uma petrotrama em aparente orientação indicando possível imbricação, pretérita à deformação, sugestiva de transporte em ambiente fluvial ou por fluxos de massa. Subordinadamente ocorrem pacotes de metarcósios, de metarenitos feldspáticos, ou não, e de filitos (Coutinho, 1972; Martin, 2000; Henrique-Pinto e Janasi, 2010).

Do Morro Doce ao Pico do Jaraguá são aflorantes os metarcósios, que apresentam bandamento composicional quando não afetados por zonas de cisalhamento. Entremeiam os metarcósios, lentes espessas de metaconglomerados polimíticos de seixos e calhaus estirados em arcabouço recristalizado. A sequência psamítica grada para filitos intermediários, as vezes psefíticos, culminando com metarenitos feldspáticos com estratificações cruzadas no topo (Carneiro, 1983; Henrique-Pinto e Janasi, 2007).

Figura 40 – Mapa geológico do noroeste de São Paulo, distritos de Anhanguera e Perus. Fonte: modificado de Coutinho (1980).

6.4 Aspectos Geológico-Geotécnicos

Na RMSP, Rodriguez (1998) após cruzar informações de relevo, geologia e lineamentos morfoestruturais concluiu que o embasamento Pré-Cambriano compreende uma região de alta potencialidade para o desenvolvimento de movimentos de massa. Os terrenos com menor potencialidade estão situados na Bacia de São Paulo, enquanto as suítes graníticas apresentam baixa a média potencialidade para movimentos de massa. Resultado corroborado por Santos et al. (2016) que analisaram áreas de risco da RMSP, cuja maioria é coincidente com relevos mais ondulados indicando forte controle geológico e geomorfológico de unidades do embasamento para a ocorrência das instabilizações.

A esculturação atual do relevo da região de Jaraguá-Perus é decorrente de processos policíclicos de erosão diferencial que acentuaram os altos topográficos locais, como o Pico do Jaraguá e o Morro Doce, sustentados por rochas mais resistentes (quartzitos e metaconglomerados, respectivamente) e com altitudes entre 1.000 e 1200 metros (Ab'Saber, 1948; Ab'Saber, 1951). Em termos de classificação, o relevo predominante é de morrotes baixos e altos e serras (Pico do Jaraguá e Morro Doce), cujas formas são retilíneas, côncavas, com anfiteatros de cabeceiras de drenagem abruptos, constituídos por solos, em geral, pouco evoluídos e rasos.

As amplitudes variam entre 80 a 340 metros, com declividades altas, entre 25° e mais de 45° (Figura 41-A), associadas a classe alta de suscetibilidade a movimentos de massa (Figura 41-B). A densidade de lineamentos e estruturas pode ser alta nestes locais e os processos geodinâmicos esperados são deslizamentos, quedas de blocos e rastejos (CPRM e IPT, 2014). Nos bairros Itaberaba I e II e Jardim Jaraguá, vizinhos, diversos deslizamentos planares foram reportados ao longo dos anos, de diferentes tipos de materiais, em taludes de corte e aterro, alguns em encostas naturais, assim como enxurradas em pequenas drenagens naturais e urbanas.

Na Serra do Morro Doce, sustentada pela unidade metaconglomerática, alguns movimentos de massa existentes são reativados por chuvas intensas, onde a massa deslocada é constituída de blocos e solo. Os metaconglomerados dispõem-se geralmente na forma de blocos e matacões arredondados e quando alterados apresentam coloração avermelhada (Carneiro, 1983). Os movimentos de massa são parte da evolução das encostas da serra, formando depósitos de tálus, que podem ser observados por investigação geológica-geotécnica de superfície e pela geometria indicativa de espessos depósitos (PMSP, 2012).

Figura 41 – (A) Mapa de declividade, com destaque para a área de estudo. (B) Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. Destaque para a área de estudo onde a classe alta é predominante. Fonte: modificado de CPRM e IPT (2014).

Ocorrem depósitos colúvio-eluvionares formados por transporte lento e sazonal (rastejo) das camadas superficiais de solo, como no Jardim Jaraguá, Rua Francisco Bellazzi, com a ocorrência identificada como colúvio, intemperizado, de baixa coesão e pouca espessura, estabilizado a meia encosta, recobrindo rocha alterada e fraturada. Depósitos de material mal selecionado, de variado tamanho, de baixa coesão, são associados a depósitos de tálus, localizados no bairro Itaberaba II, próximos às ruas Saracura e Albatroz, com espessuras maiores em relação aos depósitos coluvionares do Jardim Jaraguá, capeando solos e rochas alteradas. Estas ocorrências foram observadas em taludes de corte atualmente cobertos por edificações. Os solos no geral apresentam alta suscetibilidade à erosão demonstrada

por sulcos e deposição de material na base dos cortes (PMSP, 2003a; PMSP, 2003b). Nas matas da encosta, especialmente nos trechos mais íngremes e com acúmulo de depósitos de colúvio-tálus, ocorrem diversos tipos arbóreos com troncos inclinados no sentido da encosta, indicativos de movimentos de rastejo.

As drenagens apresentam mistura de solo e pequenos blocos expostos (centimétricos a decimétricos), evidenciando processos de enxurrada responsáveis por carrear material disperso e solto nas encostas e retrabalhar os já depositados nas linhas de drenagem. Estão presentes blocos apoiados diretamente em solo na região de alta declividade da encosta, podendo ser mobilizados por deslizamentos ou por rolamento dos próprios blocos por instabilizações do solo. Afloramentos rochosos dos metaconglomerados, nas áreas mais declivosas, são as áreas fonte dos tombamentos e quedas de blocos, formadores dos depósitos de tálus. Os blocos rolados superficiais, decimétricos a decamétricos, são encontrados até o início da ocupação do bairro Jardim Jaraguá (Figura 42).

As observações de superfície foram também verificadas em subsuperfície (Figura 43), por meio de sondagens percussivas, rotativas e mistas realizadas a ca. de 500 metros da área de estudo para a implantação do emboque Jesus dos túneis do Rodoanel Mario Covas, trecho Oeste, na mesma vertente do Morro Doce. É destacada a presença de corpos de coluvião e tálus, interpretados com base nestes dados, nas proximidades do sopé da encosta (perfil longitudinal e seção transversal, respectivamente) e do emboque dos túneis. O levantamento de estruturas (SPR-508 e Ponto 11) evidencia a intersecção de fraturas subverticalizadas e a formação de blocos na encosta (Desenvolvimento Rodoviário S.A. DERSA, 1995).

Figura 42 – (A) e (B) blocos rolados metaconglomerados na meia encosta observados na trilha. São encontrados até proximidades da ocupação do Jardim Jaraguá. Fonte: fotografias tomadas pelo autor.

Figura 43 – Síntese dos levantamentos geológico-geotécnicos realizados para implantação dos túneis e emboque Jesus do Rodoanel Mario Covas, trecho Oeste, na mesma vertente da área de estudo do Morro Doce (500 metros de distância): (A) planta de locação das sondagens e estruturas levantadas; e (B) perfil longitudinal geológico-geotécnico, com destaque para uma das seções transversais levantadas (SP-504 a SP-505) onde é delimitado um corpo de talus com espessura de cerca de 6 metros. Notar que as sondagens encontram-se deslocadas para caracterização dos respectivos perfil e seção transversal. Fonte: modificado de DERSA (1995).

A espessura do solo saprolítico pode chegar a 20 metros gradando para rocha muito alterada, pouco coerente e fraturada, de até 10 metros, seguida de rocha sã. O perfil é observado no sopé da encosta. Investigação de superfície indica afloramentos da rocha alterada (formando matacões) na quebra de relevo do topo para a vertente declivosa, indicando espessura pequena de solo, provavelmente coluvionar.

6.4.1 Histórico e Evolução dos Movimentos de Massa

O histórico dos movimentos de massa do Morro Doce, de acordo com registros e informações da Defesa Civil Distrital Anhanguera-Perus, remonta a fevereiro de 2007, com atendimento por parte da Prefeitura de São Paulo aos bairros vizinhos e encosta. Estas informações são coincidentes com as fotografias aéreas, ortofotos e imagens de satélite disponíveis, de datas de 1954, 2000, 2001, 2002, 2004, 2008, 2010 e 2017 (Google Earth Pro, 2019; PMSP, 2019a; Emplasa, 2010), onde as cicatrizes dos movimentos de massa são apenas diagnosticadas nas imagens com datas posteriores a 2008. Houve reativação da ruptura, ao menos, em setembro de 2009 e em 2012 pelas evidências fotográficas (Figura 44).

Figura 44 – Evolução histórica recente, por meio de fotografias aéreas nadir e oblíquas, ortofotos e fotografias de chão, dos movimentos de massa do Morro Doce, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP: 2004 a fotografia aérea não indica cicatrizes recentes na encosta apesar de ser visível a deposição de blocos; 2007 o primeiro registro fotográfico dos rompimentos condicionados por chuvas acumuladas seguidas de chuvas intensas e a evolução ao longo dos anos. Fonte: fotografias de chão tomadas pela Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera e pelo autor. Fotografias aéreas *nadir* PMSP (2019a), Emplasa (2010) e autor.

As chuvas que deflagraram os deslizamentos da encosta do Morro Doce em 2007 e 2009 foram de grande intensidade. O acumulado anual, de acordo com série histórica de 1934 a 1997 do pluviômetro E3-030, localizado no distrito de Perus, pertencente ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE-SP), é de 1.219,45 mm (Figura 45). A estação chuvosa é bem marcada ocorrendo, geralmente, entre outubro e novembro a março do ano seguinte, com os meses de julho e agosto secos, ou com baixa pluviosidade (DAEE, 2019).

Para a ruptura de 2007, no histórico de chuvas de Perus registrou-se um acumulado de 280,5mm para o mês de Dezembro de 2006, de 192,5mm para Janeiro do ano seguinte e de 160,1mm para Fevereiro de 2007. Neste mês de Fevereiro ocorreram dois dias seguidos, dias 7 e 8, com chuvas diárias intensas de 45mm e 62,5mm respectivamente, responsáveis pela deflagração de diversos deslizamentos nos bairros do entorno e na Serra do Morro Doce. Assim, em 48 horas o acumulado foi de 107,5mm e em 72 horas de 116,6mm. No período 2006-2007 ocorreu o fenômeno El Niño, de fraca intensidade, possivelmente responsável pelas chuvas acima da média, com exceção do mês de julho (PMSP, 2019b; CPTEC, 2019).

Em 2009 chuvas de grande intensidade iniciaram no mês de setembro, especialmente no dia 8, com acumulado diário de 90,6mm correspondendo a quase metade do acumulado para aquele mês de 2009 (185mm). Em 48 horas o acumulado permaneceu em 90,6mm (dia anterior seco) e em 72 horas de 114mm. Estas chuvas foram responsáveis pela reativação da movimentação e por diversos casos de deslizamentos por toda a cidade de São Paulo.

As chuvas mensais do período de 2009-2010 foram acima da média histórica para a região, com exceção de maio e junho, sendo consistente com o estabelecimento do fenômeno El Niño, de intensidade moderada, no período considerado (CPTEC, 2019).

Os dados disponíveis para 2012 não permitem realizar uma investigação exata do acumulado, no entanto, por fotografias é possível notar que a vegetação foi suprimida por queimada antes da movimentação (Figura 46-A, de 17/09/2012), o que pode ter influenciado diretamente na reativação e na quantidade de chuva (menor) que deflagrou o deslizamento (Figura 46-B, de 16/10/2012). O acumulado entre as fotografias de helicóptero, 30 dias corridos, é de 35,6 mm, sendo que 17,4 mm ocorreram nos dias 11 e 12 de outubro. O período 2012-2013 não registrou o fenômeno El Niño (PMSP, 2019b; CPTEC, 2019).

Figura 45 – Médias mensais para a região de Perus baseado na estação E3-030 do DAEE-SP (1934 a 1997). Pluviometria registrada pela Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera para os anos de 2007, 2009 e 2012 para comparação com a média. Fonte: DAEE (2019), PMSP (2019b).

De acordo com documentos da Defesa Civil, a queima de vegetação em 2003 para instalação de moradias pode ter atingido a parte superior da encosta, sendo recorrente e, posteriormente, registrada pelo menos nos meses secos de 2008, 2012, 2016 e 2017, incorrendo em exposição do solo às intempéries, aceleração de processos erosivos e ação cíclica da temperatura no solo, afloramentos e blocos de rocha, perda de resistência e aumento da probabilidade de ocorrência de movimentos de massa. As queimadas no entorno dos bairros são frequentes e podem ter ocorrido e atingido também a área instabilizada.

Figura 46 – Queimadas no Morro Doce, Distrito Anhanguera, São Paulo, SP: (A) em setembro de 2012 e (B) o efeito em outubro de 2012 ajudando na reativação dos deslizamentos (notar material deslizado na encosta). Fonte: Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera e autor, respectivamente.

As cicatrizes principais, geradas em 2007 e coincidentes com as reativadas, foram identificadas pela ausência de vegetação e mesmo quando ocorre a recuperação da vegetação rasteira e arbustiva do entorno ao longo do tempo, suas formas geométricas são preservadas. Feições de instabilização menores, como trincas de tração a montante e degraus de abatimento, somente podem ser observadas sem a vegetação. Os blocos de rochas e afloramentos não apresentam feições evidentes de movimentação, conforme esperado, no entanto, o entorno dos blocos, quando em solo, apresenta sulcos erosivos e feições de instabilização, como as próprias rupturas na encosta, que podem instabilizar os blocos por perda de sustentação e consequente rolamento, tombamento, ou, deslizamento.

As reativações puderam ser verificadas pela evolução dos degraus de abatimento e trincas de tração em rupturas gerando material deslizado na encosta a jusante, que se traduzem em feições fotoidentificáveis, tanto em fotografias de chão como em fotografias aéreas oblíquas e com visada *nadir*.

6.4.2 Características dos movimentos de massa

Os movimentos de massa mais recentes (solo exposto), por meio de suas feições de instabilidade (cicatrizes) foram identificados como C1 e C2. As cicatrizes evidenciam o tipo de movimento de massa instalado na porção da encosta analisada, por suas medidas e características podem ser classificadas como indicativos de deslizamentos planares rasos, com o topo de suas coroas semicirculares paralelas à linha da encosta, localizadas em quebra abrupta de relevo. Baseado no solo exposto e na forma configurada em nuvem de pontos, a cicatriz C1 tem medidas proporcionais em largura e comprimento (~10m). Há sulcos erosivos (~0,25 x 0,05m) na superfície de ruptura indicando ação das águas pluviais. A coroa é formada por um degrau de abatimento de ~0,87m (Figura 47).

A cicatriz C2, maior em relação a C1, é alongada (~24m) e estreita (~12m) quando observada em planta (característica de deslizamento planar), com trincas de tração a montante, a poucos metros da coroa, evidenciando instabilidade presente. Não foram observadas feições indicativas de processo de rotação dos materiais rompidos, ou da face da cicatriz. Os flancos laterais decorrem da movimentação ocorrida desde a coroa (em abatimento de ~1,0m), configurando terreno pouco mais elevado do que o centro da feição e do entorno externo à ela (Figura 48).

Figura 47 – Características da cicatriz 1 (C1): perfil e aspecto em planta.

O material transportado é constituído por solo superficial, incluindo blocos de tamanhos variados, que se acumula a alguns metros em uma plataforma de acumulação (início do depósito de tálus identificado), que se estende até a ocupação urbana abaixo. O perfil transversal da encosta indica a área de acumulação e que este processo não é novo na evolução da encosta.

A presença de blocos métricos até as proximidades das moradias, sobre a superfície do terreno, indica que os processos de tombamento, rolamento e deslizamento de blocos são geologicamente recentes.

Figura 48 – Características da cicatriz 2 (C2): perfil e aspecto em planta.

6.5 Aquisição de Dados de Campo

Foram realizadas duas aquisições de dados de fotogrametria SfM-MVS por RPAs na área de estudo. A primeira, em campanha única na data de 11 de outubro de 2017, foi realizada por meio de dois voos, distintos (voo #1-2017 e voo #2-2017), em alturas diferentes sobre o solo e resultou em 155 fotografias no total (95 fotos do primeiro voo e 60 fotos do segundo). Foi utilizado o DJI Phantom 4 (Figura 49-A).

O primeiro voo foi configurado a uma altura sobre o solo de 50 metros e GSD teórico de 2,19 cm/pixel, e o segundo a 60 metros e GSD teórico de 2,63 cm/pixel, com recobrimento suficiente entre os voos e, ambos, com sobreposição de 75/70. A área total coberta pelos dois voos foi de 86.900 m² ao utilizar duas baterias em 25 minutos. O tempo estava ensolarado ao realizar o sobrevoo incorrendo em sombras de acordo com a posição solar e horário de início (~15:00h).

Figura 49 – (A) Mapa da aquisição de dados de campo de 2017: dois voos realizados a alturas sobre o solo diferentes e coleta de dados GNSS. (B) Detalhe da coleta de pontos GNSS pelo receptor móvel.

Na mesma data, antes do voo, foram coletados os sete (07) pontos de apoio do terreno (cinco pontos de controle e dois pontos de verificação) com a instalação de um receptor GNSS, estação base, na encosta do Morro Doce, com o entorno livre para minimizar erros de coleta, seguida pela utilização de receptor móvel (*rover*), durante caminhamento pela área de estudo, para adquirir as posições 3D de alvos impressos colocados na superfície do terreno (Figura 49-B).

A segunda aquisição de dados de campo foi realizada em duas campanhas nas datas de 05 e 10 de junho de 2019. Na primeira, foi realizada coleta GNSS de pontos de apoio na parte inferior da área de estudo em alvos existentes no Bairro Jardim Jaraguá. Na segunda foi realizada coleta GNSS de pontos de apoio na parte superior da encosta utilizando alvos instalados em superfície e aquisição de 397 fotografias aéreas, em voo único (voo #1-2019), utilizando a plataforma e câmera DJI Phantom 4 Pro. Foram utilizadas três baterias em duração de 52 minutos, com o voo iniciando às 12:15, resultando em sombras reduzidas, apesar do tempo ensolarado (Figura 50).

Este voo foi planejado para 70 metros de altura sobre o solo incidindo em GSD teórico de 1,9 cm/pixel, com sobreposição de 76/70. A área coberta pelo voo foi significativamente maior, cerca de 237.000 m², já que foi necessário sobrevoar parte do bairro Jardim Jaraguá onde foram coletados dados GNSS em 05 de junho.

O planejamento e controle dos voos, para ambas as aquisições de dados, foi realizado por meio do MP-DME, por permitir voos com altura sobre o solo aproximadamente constante, utilizando dados da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para alinhar a altura de voo ao terreno (Figura 29).

O intervalo entre as aquisições SfM-MVS foi de 607 dias (1 ano, 7 meses e 27 dias), passando por dois períodos de chuvas de verão (novembro de 2017 a março de 2018 e novembro de 2018 a março de 2019), aumentando as chances de movimentação das instabilidades, dentro do intervalo de tempo permitido por esta pesquisa, e de ocorrer a detecção de mudanças topográficas pelo método empregado.

Na estação pluviométrica automática Jardim Anhanguera (355030885A), mais próxima da área de estudo (instalada no topo do CEU Jardim Anhanguera, a cerca de 2 Km), foi registrado 1.879,43 mm de chuvas entre as aquisições. Dez (10) dias registraram acumulados diários em 24h acima de 30 mm, considerado com potencial para reativação ou ocorrência de novos movimentos de massa de acordo com os históricos de movimentações recentes. Ao considerar acumulados de 48h são 26 ocorrências com chuvas acima de 30 mm (Figura 51-A) (Cemaden, 2019).

Figura 50 – (A) Mapa da aquisição de dados de campo de 2019: voo único realizado e coleta de dados GNSS. (B) Detalhe da coleta de dados GNSS pelo receptor móvel, no bairro e na encosta.

Em termos mensais, considerando o intervalo de pesquisa, 2017 teve outubro (125,28 mm) e novembro (156,23 mm) registrando acumulados acima da média histórica (108,54 e 116,15mm, respectivamente), apontadas pela estação do DAEE-SP. Em 2018 as chuvas registradas no primeiro semestre (janeiro e julho) indicam índices abaixo da média.

O segundo semestre de 2018 volta a apresentar chuvas próximas aos valores das médias nos meses de agosto (36,79mm), setembro (76,98mm) e outubro (91,71mm), com os restantes abaixo da média. O ano de 2019 apresenta pluviosidade maior em fevereiro (264,93mm), março (162,81mm) e abril (197,2mm), todos acima das médias históricas respectivas (Figura 51-B).

Figura 51 – Distribuição das chuvas de acordo com a estação pluviométrica Jardim Anhanguera: (A) em acumulado diário e (B) acumulado mensal. Fonte: Cemaden (2019).

6.6 Processamento GNSS

Para critério de aceitação dos pontos de apoio, bases e estações em projeto foi definido limite para precisão horizontal menor que 0,050m ou precisão vertical menor que 0,100m (para valores maiores os pontos são assinalados em falha), conforme recomendações do *Spectra Precision Survey Office* (SPSO). Outros parâmetros incluem utilização de máscara de elevação de 10° acima do horizonte, várias frequências (L1 e L2, ou mais), intervalo de processamento compatível com a coleta de dados (15s para as bases e 1s para os respectivos pontos) e tipo de efemérides automático (SPSO adota automaticamente como transmitida quando ela é a única disponível, e *mixed*, ou, precisa em presença de efemérides precisas).

Para o processamento em escritório dos dados GNSS geodésicos, os dados brutos de campo foram coletados em formato G-files (*ATOM Raw Data Files*) pelo equipamento SP60 (receptor estático, ou base, e receptor móvel, ou *rover*). Durante importação no SPSO, através do GUI, foram convertidos automaticamente para o formato Q-files, padrão de trabalho do *software*.

Foram importados também os dados das estações de referência da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mais próximas da área de estudo (IBGE, 2019). E adquiridos dados diários das observações de 11/10/2017, 05/06/2019 e 10/06/2019, fornecidos pelas estações Escola Politécnica da USP (POLI), Campinas-UNICAMP (SPC1), Bragança Paulista (SPBP) e Sorocaba (SPS1), localizadas ao redor da área de interesse, no estado de São Paulo. Foram obtidos também os arquivos com informações das efemérides finais (precisas) dos satélites das constelações *Global Positioning System*-NAVSTAR (GPS) e GLONASS, disponibilizados pelo *International GNSS Service* (IGS) entre 12 a 18 dias após as datas de aquisição, para maior precisão da correção do posicionamento das bases e dos pontos de apoio em relação às transmitidas (disponíveis no momento das observações). Os relatórios de processamento estão em Anexo C e Anexo D.

O SPSO transforma automaticamente as altitudes elipsoidais (h) coletadas em campo pelos receptores GNSS em altitudes ortométricas (H) pelo modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015 ao decrescer o valor da altura geoidal (N) (Figura 52), que para a área de estudos é de -3,03 m (IBGE, 2016). Os dados foram processados utilizando as efemérides transmitidas e precisas para avaliação das correções para as bases com ambos os tipos de efemérides.

As bases locais estáticas, denominadas de BP1, para a aquisição de 11/10/2017, BP2 e BP3, para as campanhas dos dias 05/06 e 10/06 de 2019, respectivamente. Seus tempos de rastreamento são 03h32min, 05h58min e 02h45min, respectivamente. Este tempo influencia diretamente na precisão da determinação do posicionamento de cada uma das bases e na correção dos pontos de apoio respectivos. BP1 foi instalada na área de estudo no topo da encosta do Morro Doce, BP2 na cobertura do CEU Jardim Anhanguera, cerca de 2 km da área de estudo, e BP3, novamente no topo do Morro Doce, inserida na área de estudo.

A correção de posicionamento das bases foi realizado em relação às estações de referência da RBMC. A estação geodésica RBMC POLI sempre apresentou precisão maior, pela menor distância entre as observações das bases e da estação RBMC (cerca de 12 km) em relação às outras estações, utilizando as efemérides transmitidas (Tabela 15), ou as finais (Tabela 16).

Figura 52 – Relação entre altitude elipsoidal (obtida por sistemas GNSS), altitude ortométrica (relativa ao nível médio do mar) e altura geoidal fornecida pelo MAPGEO2015. Fonte: modificado IBGE (2016).

Durante 03h32min, BP1 rastreou as constelações GPS-NAVSTAR, GLONASS, Galileo e BeiDou em um total de 35 satélites, para a observação POLI-BP1, permitindo uma precisão de posicionamento maior em detrimento da utilização de apenas uma constelação, com um *Positioning Dilution of Precision* (PDOP) de 1,70. O PDOP é um indicador da geometria 3D dos satélites rastreados, relacionada ao número de satélites, e da degradação da precisão da posição. Durante a coleta o tempo estava limpo e ensolarado. Utilizando as efemérides finais de GPS-NAVSTAR e GLONASS, no processamento, o rastreo é reduzido a 20 satélites (restrito apenas aos satélites com as órbitas finais calculadas), aumentando o PDOP para 2,057.

A utilização das efemérides precisas melhorou a precisão da correção, para a horizontal (de 0,009 para 0,008, em decréscimo de 11,11%) e a vertical (de 0,040 para 0,035, em decréscimo de 12,5%) apesar do aumento esperado do valor do PDOP (de 1,70 para 2,06, um aumento de 20,65%). Houve melhora de precisão também para SPC1-BP1 mesmo com aumento do PDOP.

Tabela 15 – Resultados do processamento de correção do posicionamento das bases BP1, BP2 e BP3 em relação às estações de referência RBMC com efemérides.

Base	De	Para	Tipo de Solução	Precisão H (m)	Precisão V (m)	RMS (m)	PDOP Máx.	Distância Elipsoide (m)	Δ Altura (m)
BP1	SPC1	BP1	Fixa	0,028	0,094	0,052	1,705	75.694,48	403,07
	POLI	BP1	Fixa	0,009	0,040	0,032	1,705	13.150,62	295,40
BP2	SPC1	BP2	Fixa	0,011	0,037	0,015	1,823	74.618,70	139,15
	POLI	BP2	Fixa	0,005	0,021	0,019	1,811	14.063,40	31,48
	SPBP	BP2	Fixa	0,011	0,035	0,015	1,823	62.620,25	-131,56
BP3	SPC1	BP3	Fixa	0,020	0,074	0,015	1,540	75.703,39	405,67
	POLI	BP3	Fixa	0,008	0,032	0,017	1,540	13.141,56	298,03
	SPBP	BP3	Fixa	0,024	0,075	0,016	1,540	64.415,54	134,97

Fonte: elaborado pelo autor no SPSO.

Tabela 16 – Resultados do processamento de correção do posicionamento das bases BP1, BP2 e BP3 em relação às estações de referência RBMC com efemérides finais (precisas).

Base	De	Para	Tipo de Solução	Precisão H (m)	Precisão V (m)	RMS (m)	PDOP Máx.	Distância Elipsoide (m)	Δ Altura (m)
BP1	SPC1	BP1	Fixa	0,024	0,081	0,016	2,019	75.694,48	403,07
	POLI	BP1	Fixa	0,008	0,035	0,032	2,057	13.150,63	295,40
BP2	SPC1	BP2	Fixa	0,010	0,039	0,015	2,264	74.618,70	139,15
	POLI	BP2	Fixa	0,005	0,022	0,019	2,264	14.063,40	31,48
	SPBP	BP2	Fixa	0,011	0,038	0,015	2,264	62.620,25	-131,56
BP3	SPC1	BP3	Fixa	-	-	-	-	75.703,39	405,67
	POLI	BP3	Fixa	0,008	0,032	0,017	1,618	13.141,56	298,03
	SPBP	BP3	Fixa	-	-	-	-	64.415,54	134,97

Fonte: elaborado pelo autor no SPSO.

Para a base BP2, durante o tempo de coleta de 05h58min, foram rastreados 50 satélites, de todas as constelações (GPS-NAVSTAR, GLONASS, Galileo, BeiDou), nas observações POLI-BP2 (PDOP 1,81), SPC1-BP2 e SPBP-BP2 (PDOP 1,823). As condições atmosféricas foram desfavoráveis a maiores precisões do rastreo por estar encoberto, com garoa em mais da metade do tempo de rastreo. Utilizando apenas as efemérides precisas o número de satélites utilizados foi reduzido para 34, com PDOP de 2,26 para todas as observações. Neste caso, a utilização das efemérides precisas não teve impacto nas correções da posição de BP2.

Para SPC1-BP2 houve ligeira melhoria na precisão horizontal (de 0,011 para 0,010, em decréscimo de 9,09%), porém para as precisões verticais houve piora para todas as observações. No caso de POLI-BP2 a precisão vertical passou de 0,021 para 0,022 (acrécimo de 4,76%). Este comportamento provavelmente se deve ao tempo prolongado de rastreo de BP2 (05h58min) e, conseqüente número de satélites observados, melhorando o posicionamento da base em detrimento da utilização dos dados de órbitas precisas.

A base BP3 rastreou 43 satélites com PDOP de 1,54 para todas as observações, passando a 23 satélites ao utilizar as órbitas precisas (PDOP de 1,62). Utilizando as efemérides precisas, a análise foi restringida apenas à observação POLI-BP3, já que as demais SPC1-BP3 e SPBP-BP3 não passaram nos requisitos de aceitação de projeto, não sendo comparáveis. A utilização das órbitas precisas não aprimorou os resultados da correção de BP3, mantendo exatamente os mesmos valores de precisão vertical, horizontal e média.

Pelo apresentado, em termos da precisão das correções com as efemérides finais para as constelações GPS-NAVSTAR e GLONASS, optou-se por utilizar as

órbitas finais para a correção de BP1, BP2 e BP3, mesmo com a diminuição do número de satélites rastreados (e aumento do PDOP) e de não melhorar significativamente os resultados das correções. Automaticamente, estas correções baseadas nas efemérides finais foram transferidas para os pontos de apoio respectivos. A correção dos posicionamentos das bases é abalizada pela estação RBMC mais próxima, que apresenta os maiores valores de precisão, podendo ser descartadas as observações com distâncias maiores. Assim, as correções foram unicamente realizadas com a estação RBMC POLI.

As estações de referência RBMC não mencionadas no processamento das bases, como SPS1 e SPBP, tiveram os valores de coordenadas nos arquivos diários discrepantes de seus descritivos (coordenadas reais e conhecidas), ou, não passaram nos requisitos de aceitação definidos em projeto no SPSO após o processamento, sendo excluídas da análise.

Após a correção das bases locais, as linhas de base formadas entre BP1, BP2 e BP3 e os respectivos pontos de apoio coletados foram pós-processadas, chegando-se a precisões horizontal e vertical na terceira casa decimal, para os pontos coletados em 2017 (Tabela 17) e variando de uma precisão milimétrica a centimétrica para os coletados em 2019 (Tabela 18).

Os pontos de apoio que apresentaram precisão centimétrica, relacionados à base BP2, foram aqueles coletados em alvos existentes, em meio urbano, onde as edificações e árvores próximas causaram o fenômeno de multicaminhamento. Esta fonte de erro é provocada pela reflexão dos sinais dos satélites em superfícies próximas ao receptor GNSS, como edificações e árvores, causando múltiplas medidas e piorando a precisão destas.

Tabela 17 – Aquisição 2017: Posicionamento pós-processado, com efemérides precisas, dos pontos de apoio coletados em campo, na campanha de 11/10/2017, e corrigidos por BP1.

Ponto	Leste (m)	Norte (m)	Elevação (m)	Precisão H (m)	Precisão V (m)	RMS
BP1-113	316.689,124	7.405.083,744	918,479	0,005	0,007	0,010
BP1-114	316.675,448	7.405.032,805	940,059	0,006	0,007	0,010
BP1-115	316.644,655	7.405.070,106	930,273	0,005	0,006	0,010
BP1-116	316.625,532	7.405.060,241	937,953	0,007	0,009	0,015
BP1-117	316.560,673	7.404.971,100	1.017,227	0,004	0,009	0,010
BP1-139	316.520,895	7.405.004,207	1.016,395	0,005	0,009	0,009
BP1-134	316.487,452	7.405.050,107	1.022,086	0,005	0,008	0,016

Fonte: elaborado pelo autor no SPSO.

Tabela 18 – Aquisição 2019: Posicionamento pós-processado, com efemérides precisas, dos pontos de apoio coletados em campo nas campanhas de 05 e 10/06/2019 e corrigidos por BP2 e BP3, respectivamente.

Ponto	Leste (m)	Norte (m)	Elevação (m)	Precisão H (m)	Precisão V (m)	RMS
BP2-01	316641,839	7405328,265	852,612	0,012	0,041	0,020
BP2-02	316832,592	7405244,762	846,070	0,014	0,039	0,025
BP2-03	316838,107	7405166,464	851,442	0,017	0,031	0,022
BP2-04	316828,606	7405163,318	852,013	0,012	0,025	0,022
BP2-05	316867,626	7405145,827	849,728	0,016	0,025	0,022
BP3-01	316508,882	7405018,553	1.020,557	0,005	0,006	0,014
BP3-02	316475,572	7405028,661	1.029,095	0,004	0,008	0,015
BP3-03	316494,658	7405137,059	988,980	0,003	0,004	0,009
BP3-04	316453,235	7405045,321	1.032,440	0,003	0,004	0,011

Fonte: elaborado pelo autor no SPSO.

6.7 Conversões, calibrações das câmeras e análise das aquisições

As imagens aéreas obtidas em formato RAW (*.DNG), como as de 2017, foram convertidas em escritório para JPEG (por facilitar a armazenagem, manipulação e processamento) utilizando parâmetros padrão para este tipo de conversão, sem correção da distorção geométrica. As de 2019 foram obtidas diretamente em JPEG pelo DJI Phantom 4 Pro, contando com compensação inicial, automática e interna à câmera, da distorção da lente na obtenção das imagens.

No processamento SfM-MVS são consideradas as orientações espaciais e de atitude da câmera (parâmetros extrínsecos) para cada imagem adquirida, correspondendo às orientações externas (OE). Também é considerada a orientação interna (OI), própria da câmera, que corresponde à descrição dos parâmetros intrínsecos e coeficientes de distorção da lente, inerentes, do sensor e conjunto ótico.

A modelagem de uma câmera real, por meio dos seus parâmetros de orientação interna (POI) é chamada de calibração da câmera, que pode ser prévia, ou por autocalibração (utilizando imagens não calibradas e seus pontos). Para evitar a falta de pontos (e de imagens alinhadas), ou distorções geométricas (*bowl effect*) por imprecisão da autocalibração, adotou-se a calibração prévia como uma etapa antecedente para a primeira aproximação e restrição da autocalibração.

Foram obtidas imagens de um alvo planar 2D (27 para 2017 e 19 para 2019), com geometria em padrão de grade, ou *checkboard*, para realizar a calibração prévia das câmeras dos RPAs DJI Phantom 4 (FC330) e DJI Phantom 4 Pro (FC6310), utilizando a ferramenta *Tools > Lens > Calibrate Lens....* O alvo é exibido em monitores LCD e a câmera é movimentada livremente focando o padrão para obtenção de

imagens. A estimativa inicial dos POIs, restrita pelos metadados Exif, é realizada por ajustamento por feixe de raios pelo modelo perspectivo geométrico de distorção de Brown: distância focal (f), coordenadas dos pontos principais (C_x , C_y), coeficientes de transformação (B_1 , B_2), coeficientes de distorção radial (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) e distorção tangencial (P_1 , P_2 , P_3 , P_4) (Agisoft, 2019b).

A utilização inapropriada de POIs adicionais na autocalibração pode introduzir variáveis desconhecidas e influenciar negativamente na determinação dos mesmos na autocalibração, ocorrendo excesso da parametrização e tornando fraca a solução global do AFR (Remondino e Fraser, 2006; James et al., 2017a; Jaud et al., 2019).

Para o processamento ter o melhor modelo de câmera, para cada aquisição, foram calibrados modelos das câmeras FC330 e FC6310. Os resultados (Tabela 19 e Tabela 20), considerando os valores dos pontos de controle, verificação e sua razão, indicaram o Modelo C para 2017 (menor erro nos pontos de controle e verificação, mantendo uma boa razão entre eles). O Modelo D, com aumento do erro nos pontos de apoio, indicou excesso de parametrização e possível sobreajuste. Para 2019 os resultados indicaram o Modelo B, com menos POIs para evitar o excesso de parametrização do modelo.

Os valores de erro nos pontos de controle e verificação para aquisição de 2019 são maiores, relativamente aos de 2017, refletindo nas diferentes variáveis que compõem o erro e, principalmente, por não adotar a solução de compensação do efeito de varredura do sensor (a câmera FC6310 tem obturador mecânico).

A OE, como rotação (ϕ , ω , κ) e posição das câmeras (X , Y , Z), é recuperada durante o alinhamento das câmeras (triangulação), etapa que também refina a OI da calibração prévia por AFR. Quanto mais imagens, maior o número de pontos homólogos e melhor resultado da autocalibração. Para um mesmo número de imagens a maior densidade de pontos é atingida alterando-se o processamento.

Tabela 19 – Modelos, parâmetros de orientação interna e respectivos erros nos pontos de apoio.

Modelo	Parâmetros de Orientação Interna	2017			2019 ³		
		CTL	VER	Razão	CTL	VER	Razão
A	$F, C_x, C_y, K_1, K_2, K_3$	0,36	0,76	2,13	3,80	3,50	0,92
B¹	$F, C_x, C_y, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$	0,36	0,76	2,13	3,49	3,73	1,07
C²	$F, C_x, C_y, K_1, K_2, K_3, B_1, B_2, P_1, P_2$	0,33	0,59	1,80	4,26	4,60	1,08
D	$F, C_x, C_y, K_1, K_2, K_3, K_4, B_1, B_2, P_1, P_2, P_3, P_4$	0,32	0,61	1,88	3,46	3,67	1,06

CTL = Ponto de Controle, VER = Verificação. ¹Padrão ASMS para alinhamento inicial; ²Recomendado pelo suporte ASMS (Agisoft Community Forum, 2019); ³2019: Sem correção do sensor de varredura. Todos com pesos de pontos de apoio = 0,1pix e pontos homólogos = 1,0pix.

Figura 53 – Gráficos de distorção resultantes do processo de calibração prévia das câmeras utilizadas nas aquisições de 2017 (FC330_3.61_C_rolling_shutter) e 2019 (FC6310_8.8_B).

Em caso de persistência de distorção geométrica, a calibração prévia, desde que bem estimada e proveniente de uma geometria precisa, pode ser fixada (não ocorre a autocalibração durante o alinhamento, ou por AFR posteriormente). Outras soluções, que minimizam a distorção, são a utilização de pontos de controle, ou, o aumento da densidade distribuída de pontos homólogos.

O ASMS utiliza matrizes de correlação para análise dos parâmetros de OI (POI). Para FC330 e FC6310 (Tabela 21) mostram que K_1 , K_2 , K_3 e K_4 têm correlação muito forte ($>0,9$), normal para modelos de distorção radial, indicando que esta pode ser modelada por apenas um dos parâmetros. Os termos K_2 e K_3 , no entanto, são comuns na fotogrametria e foram utilizados também, além de fazerem parte do conjunto de POIs padrão ao ASMS.

Tabela 20 – Calibração prévia das câmeras: parâmetros de OI e coeficientes de distorção.

Coeficientes	DJI Phantom 4 (FC330_C)			DJI Phantom 4 Pro (FC6310_B)		
	Média		Desvio Padrão	Média		Desvio Padrão
f (EXIF)	3,61			8,8		
f (mm)	2.323,44	±	0,33	3.646,24	±	0,41
C_x (mm)	2,65	±	0,17	-10,87	±	0,38
C_y (mm)	-17,56	±	0,17	13,27	±	0,27
B_1	-2,24	±	0,04	-		-
B_2	2,03	±	0,04	-		-
K_1	-0,13	±	2,74E-04	0,004	±	4,02E-04
K_2	0,11	±	5,94E-04	-0,01	±	1,37E-03
K_3	-0,02	±	3,84E-04	0,01	±	1,38E-03
P_1	-8,69E-05	±	2,03E-05	-8,40E-04	±	3,48E-05
P_2	3,56E-04	±	1,44E-05	-5,19E-04	±	2,18E-05

Fonte: projetos de 2017 e 2019 no ASMS v. 1.5.1.

Tabela 21- Matrizes de correlação dos POIs das câmeras FC330_C e FC6310_B.

	C_x	C_y	B_1	B_2	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2		C_x	C_y	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2
f	0,01	0,53	0,32	0,02	-0,40	0,36	-0,28	-0,03	-0,14	f	0,10	0,21	-0,17	0,17	-0,16	0,12	0,00
C_x	1,00	-0,01	-0,03	-0,24	-0,02	0,02	-0,02	0,71	-0,04	C_x	1,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,88	-0,04
C_y		1,00	0,48	-0,05	-0,09	0,08	-0,05	-0,03	0,23	C_y		1,00	0,05	-0,04	0,02	0,00	0,62
B_1			1,00	0,00	-0,05	0,01	0,02	-0,01	-0,21	K_1			1,00	-0,96	0,90	0,00	-0,02
B_2				1,00	0,00	0,00	0,00	0,12	-0,01	K_2				1,00	-0,98	-0,01	0,02
K_1					1,00	-0,97	0,91	0,00	0,01	K_3					1,00	0,00	-0,02
K_2						1,00	-0,98	0,00	0,00	P_1						1,00	-0,03
K_3							1,00	0,00	0,00	P_2							1,00
P_1								1,00	-0,03								
P_2									1,00								

Fonte: projetos 2017 e 2019 no ASMS v.1.5.1.

Ademais, para FC330 a distância focal f tem correlação fraca para B_1 , K_2 - K_3 e moderada com C_y e K_1 . Os coeficientes B_1 e B_2 têm correlação moderada com C_y e C_x (0,48 e -0,24, respectivamente) e C_x e C_y com P_1 (0,71) e P_2 (0,23). Em FC6310, C_x e C_y têm correlações com P_1 (0,88) e P_2 (0,62) respectivamente, o que é invariavelmente normal (Remondino e Fraser, 2006).

Os modelos de calibração para as câmeras FC330 e FC6310 e os metadados de posição das imagens, serviram como referência para a autocalibração. Os ajustamentos AFR posteriores, após cada filtragem de pontos, também seguiram o mesmo modelo para refinar a autocalibração e a geometria, restritos apenas pelas observações dos pontos de controle com coordenadas 3D.

Os processamentos iniciais, para estudo e análise dos dados coletados, seguiram o seguinte fluxo de trabalho: criação de bloco de trabalho, adição das imagens, conversão das coordenadas para as dos pontos de apoio, remoção das imagens de baixa qualidade, determinação dos pontos homólogos por pares de imagens, alinhamento entre pares de fotografias com ajuste adaptativo do modelo da câmera, reconstrução da geometria 3D e ajustamento por feixe de raios e modelo de câmera padrão (Modelo B no ASMS).

Tabela 22 – Comparação entre processamentos ASMS de conjuntos de imagens pré-processadas.

Parâmetros de Análise	Original Referência ¹	Contraste +10 ¹	Cor Automática ¹	Tom Automático ¹
Câmeras alinhadas	148	147	150	151
Pontos válidos	130.875	129.879	130.858	130.871
Pontos inválidos	7.536	7.679	7.046	6.946
Total de pontos	138.411	137.558	137.904	137.817
Erro reprojeção RMS (pix)	0,474	0,465	0,472	0,473
Erro reprojeção máximo (pix)	18,666	18,061	18,190	18,242
Erro pontos de controle (m)	0,003	0,003	0,003	0,003
Erro pontos de verificação (m)	0,005	0,005	0,005	0,005

¹ processamento de imagens padrão do Adobe Photoshop. Fonte: elaborado pelo autor.

Para verificar se processamentos digitais simples de imagens afetariam a identificação e descrição de feições e na reconstrução 3D pelo ASMS, foram processadas as 155 fotografias de 2017, em lote, no editor de fotos Adobe Photoshop, com as seguintes características: aumento de contraste em dez (10) pontos e correções automáticas de cor e tom (Tabela 22).

Não houve melhora substancial em número de pontos válidos, nos erros de reprojeção médio, máximo e nos erros dos pontos de controle e verificação. O pré-processamento por tom automático apresentou-se ligeiramente melhor ao alinhar o maior número de fotografias (151/155) e resultar no menor número de pontos inválidos, com uma razão de válido-inválidos melhor que os demais.

Isto ocorre, pois o ajuste automático de contraste se realiza por canal de cor (vermelho, verde e azul), para que o pixel mais luminoso seja branco (255) e o mais escuro preto (0), distribuindo o restante dos valores dos pixels no intervalo. O contraste em dez pontos ajustou a imagem como um todo (não por canal), aproximando as áreas claras do branco e vice-versa e apresentou o menor número de fotografias alinhadas (147/155), menor número de pontos válidos (129.879) e maior de inválidos (7.679). O aumento de contraste por canal de cor aumenta ligeiramente a capacidade do SIFT identificar pontos válidos em relação aos inválidos, com capacidade de alinhar mais câmeras em relação aos outros conjuntos de imagens. No entanto, isto pode ser alcançado alterando o limite de identificação de feições por imagem (Limite de Feições) e acurácia do alinhamento, assim, não foram realizados processamentos digitais simples nas imagens.

Os dois voos de 2017 foram adquiridos em alturas distintas e constantes sobre o solo e, para avaliar esta configuração de aquisição, foram processados com parâmetros padronizados e recomendados no manual do ASMS da seguinte forma: (1) separados (2) com posterior alinhamento dentro do *software* e (3) em um único processamento (Tabela 23).

Ao comparar os voos #1-2017 e #2-2017 observou-se o aumento do erro de reprojeção com o aumento da altura média sobre o solo. Este comportamento é esperado uma vez que as feições do terreno são menos reconhecidas em cada imagem aérea, fazendo com que a busca por pontos homólogos pelo identificador e descritor SIFT seja dificultada. Com o aumento da altura do voo ocorre o esperado aumento do valor da resolução GSD e do erro total de posicionamento (considerando o GNSS de navegação embarcado no RPA).

Tabela 23 – Comparação entre processamentos dos voos #1-2017 e #2-2017 realizados em alturas sobre o solo diferentes, com sobreposição entre eles, no ASMS.

Propriedades	1	2	3	4
Altura média sobre o solo (m)	60,6	88,5	71,9	71,4
GSD médio (cm/pix)	2,67	3,77	3,12	3,07
Câmeras alinhadas/total	88/95	60/60	148/155	148/155
Pontos homólogos válidos/total	83.374/ 87.288	85.792/ 89.742	169.166/ 177.030	173.435/ 181.727
Erro de reprojeção RMS (pix)	0,32	0,53	0,44	0,46
Erro de reprojeção máximo (pix)	7,38	16,58	16,58	17,10
Residual das câmeras (GNSS de navegação embarcado)				
Erro total (m)	1,26	2,30	1,77	1,85
Erro X (m)	0,56	1,01	0,75	0,80
Erro Y (m)	1,01	1,70	1,33	1,37
Erro Z (m)	0,52	0,95	0,90	0,95
Ponto de verificação BP1-116 (GNSS geodésico)				
Erro (m)	0,004	-	0,004	0,007
Erro (pix)	0,071	-	0,071	0,074

¹voo #1-2017; ²voo #2-2017; ³alinhamento (*align*) e junção (*merge*) dos voos #1-2017 e #2-2017 no *software*; ⁴processamento único dos voos #1-2017 e #2-2017. Fonte: elaborado pelo autor.

O *software* realizou o cálculo do GSD médio para cada um dos processamentos, cujos valores são ligeiramente diferentes entre o processamento por alinhamento e junção dos voos (*align* e *merge*), realizados por uma ferramenta própria ao *software*, e o processamento único. Os valores obtidos pela junção se aproximam mais de uma média aritmética do que os obtidos pelo processamento único. Em termos de pontos válidos, o processamento único leva vantagem numérica, 173.435 pontos, por não depender dos processamentos individuais, onde as fotografias aéreas são analisadas pelo *software* em sua totalidade, contra os 169.166 pontos válidos do processamento individual seguido de junção.

O erro posicional entre os processamentos não varia significativamente, considerando o erro do GNSS embarcado disponível nos metadados. Como esperado, os erros são menores quanto menor a altura de voo sobre o solo e se aproximam de uma média ao juntar as imagens. Para os processamentos de área toda (de alinhamento e junção e único), utilizando pontos de apoio de terreno, um ponto de verificação (BP1-116) mostra diferença de 0,003 metros, possivelmente pela incorporação do voo #2-2017 no processamento único. A disposição dos pontos de apoio, que foram organizados para a área toda, fez com que o voo #1-2017 tivesse erro idêntico ao processamento por alinhamento e junção, inferindo que este valor é o considerado neste processamento e, da mesma forma, que não permitiu avaliar #2-2017, uma vez que BP1-116 não foi observado neste voo.

Não ocorrem diferenças significativas entre o processamento individual para os diferentes voos, com posterior alinhamento seguido de junção *in software*, e o processamento único ou combinado dos voos. No entanto, em termos de processamento único, o número de pontos válidos é maior e a resolução ligeiramente maior. Além disso, ao realizar o processamento único, não existe a possibilidade da inserção não controlada de erros de registro entre as nuvens de pontos esparsas, utilizando apenas o SfM, mais robusto que as técnicas de alinhamento de nuvens de pontos, como a utilizada pelo *software*.

As diferenças entre os erros de reprojeção (RMS e máximo) produzidos para as duas formas de processamento provavelmente são devido ao número diferente de pontos homólogos válidos identificados, com a tendência a ser maior no processamento único, que também tem maior número de pontos válidos.

Desta forma, em casos de aquisições aéreas a diferentes alturas de voo sobre o solo, desde que tenham recobrimento suficiente, os resultados sugeriram que o processamento destas fosse único, otimizando o processamento. Assim, foi feito o processamento único das imagens de 2017.

6.7.1 Parâmetros de entrada e filtragem de erros

Não existem configurações recomendadas de processamento SfM-MVS, para gerar bons resultados, pois são dependentes da forma de obtenção das fotografias, das condições ambientais e das configurações da câmera (balanço de branco, exposição, velocidade, etc.). Pacotes de *software*, como o ASMS, minimizam as configurações para o usuário com correções internas automáticas uma vez que podem existir uma infinidade de ajustes. Ainda assim, existem parâmetros básicos acessíveis, onde diferentes ajustes derivam resultados diferentes.

Para determinar estes parâmetros, ou suas influências, no alinhamento das imagens e reconstrução 3D, no ASMS, foi realizada uma série de processamentos com as imagens de 2017, para diminuir o tempo de processamento em detrimento do conjunto de 2019 de maior número de imagens e resolução e servir como guia para os processamentos.

As métricas disponíveis no *software* para acompanhar o processo SfM com diferentes parâmetros de entrada são: (1) qualidade das imagens, (2) erro de reprojeção, (3) incerteza da reconstrução, (4) contagem de imagens e (5) acurácia da projeção (Agisoft, 2019b; Agisoft Community Forum, 2019).

A qualidade de uma imagem foi ser entendida por sua nitidez (*sharpness*) e textura, assim, ligada à capacidade do algoritmo de detectar feições. Os motivos para baixa qualidade são: desfocagem, relacionados à movimentação da câmera e das condições de iluminação; distorções da lente, como aberrações cromáticas; reflexos especulares; problemas de exposição (subexposição, ou superexposição) e saturação; vinhetagem e outros ruídos. As imagens utilizadas (e para todos os processamentos subsequentes) apresentaram menos de 25% de desfocagem (*blur*), sendo as demais descartadas dos processamentos (Tabela 24).

O erro de reprojeção é o erro máximo e erro médio do posicionamento dos pontos, medido em pixels. A partir do ponto 3D, reconstruído com base nos pontos 2D das imagens, é feita a reprojeção em cada uma das imagens. A distância entre o ponto da imagem e de seu reprojeto, no plano da imagem, é conhecida como erro de reprojeção (Figura 54-A). A média de todas as distâncias é o erro médio de reprojeção e um indicador global da qualidade da reconstrução 3D.

A incerteza de reconstrução é a possível variação, máxima e mínima, no posicionamento de cada ponto 3D reconstruído com base nos pontos 2D de cada uma das imagens. Esta variação é representada por elipsoides de incerteza calculadas a partir do desvio, máximo e mínimo, do ponto 3D. Linhas de base curtas aumentam a incerteza de reconstrução enquanto as longas a diminuem (Figura 54-B). Esta medida reflete na acurácia posicional dos pontos 3D da nuvem de pontos.

A acurácia de projeção é relacionada ao tamanho (escala) do ponto em cada plano de imagem (*key point size*). O tamanho é dado pelo diâmetro da vizinhança significativa de cada ponto 2D, que contém informações de sua descrição, dado pelo algoritmo SIFT. As projeções dos *key points* para um ponto 3D (*tie point*) assumem a forma de cones de diâmetros proporcionais aos tamanhos de cada um dos pontos no plano da imagem (Figura 54-C). A acurácia dos pontos 3D é dada pela média (*mean key point size*) de todos os tamanhos dos respectivos *key points*.

Tabela 24 – Métrica qualidade das imagens para as aquisições de 2017 e 2019.

Aquisição	Número de Fotografias	Resolução (pixels)	Qualidade Média	Desvio Padrão
2017	155	3992x2992	0,83	0,02
2019	484	5472x3648	0,85	0,02

Fonte: projeto das aquisições 2017 e 2019 no ASMS, v.1.5.1.

Por fim, a contagem de imagens é dada pelo número de câmeras e suas imagens, que observaram uma única feição (*key point* único para cada imagem). Ou seja, o número de *key points* para esta feição é igual ao número de imagens que a imageou. A média de todas as contagens de imagens pelo número de pontos é a sobreposição efetiva, relacionada aos *key points* e não às áreas das imagens (Figura 54-D), ou a multiplicidade média dos pontos (*tie point multiplicity*). A imprecisão de um ponto 3D diminui com o aumento da sobreposição efetiva.

No ASMS o parâmetro Limite de Feições (LdF), número máximo de feições (*key point limit*) por imagem, foi aumentado gradativamente em passos de 1.000, enquanto o parâmetro Limite de Pontos Homólogos (LPH), número máximo de pontos homólogos (*tie point limit*) para cada par de imagens, foi configurado em zero (0) para considerar a totalidade de pontos identificados (sem filtragem automática) e gerar nuvens de pontos esparsas totais para cada passo.

Figura 54 – Métricas de qualidade: (A) erro de reprojeção. Fonte: modificado de <http://support.pix4d.com/> (B) Incerteza da reconstrução 3D: notar a diferença entre linhas de base curtas e longas. (C) Acurácia da projeção: relacionada aos tamanhos (escalas) dos pontos (feições) nas imagens. Fonte: Moons et al. (2008). (D) Contagem da imagem, ou multiplicidade dos pontos homólogos, é relacionada à sobreposição efetiva. Fonte: Agisoft Community Forum (2019).

Isto foi realizado para duas precisões de alinhamento: *Highest* (Elevada), que aumenta a resolução das imagens por um fator de 4 (2 vezes em X e 2 vezes em Y), o que permite detectar feições com maior precisão, e *High* (Alta), que mantém o tamanho original das imagens. Outras precisões diminuem a resolução das imagens (*downscale*) e não foram analisadas. Para automatizar o processo repetitivo os processamentos foram realizados em Python em blocos por intervalo de LdF.

Para *Highest*, até o número máximo de LdF observa-se o aumento do número total de pontos homólogos (válidos e inválidos), especialmente em função dos pontos válidos (que formam a nuvem de pontos esparsa). O número de pontos inválidos aumenta, mas não a ponto de impedir o crescimento do número de pontos válidos. O valor padrão do *software* é de 40.000 LdF o que gerou uma nuvem de pontos esparsa de 133.304 pontos válidos, enquanto que para um valor de entrada de 300.000 gerou uma nuvem com 532.728 pontos (Figura 55-A).

Com as 155 imagens de entrada, a partir do valor LdF de 100.000 o número de fotos alinhadas, sem necessidade de amarração manual, ultrapassa as 150. Para o valor de entrada padrão do *software* 147 imagens foram alinhadas automaticamente, excluindo do alinhamento oito (8) imagens e seus dados de estrutura.

O erro de reprojeção médio, para *Highest*, decresce com o aumento do número de pontos identificados e utilizados na nuvem de pontos (Figura 55-C). O erro de reprojeção máximo estabiliza ao redor de 16 pixels, após o valor de 40.000 para LdF, com exceção entre 107.000 e 178.000 ao diminuir para 11 pixels (Figura 55-D). Com o aumento do número de *key points*, menor o erro médio de reprojeção.

O tamanho médio dos *key points* diminui até o limite de 40.000, decrescendo a declividade com o aumento dos passos, assim, quanto maior o LdF mais precisos os pontos da nuvem de pontos. A multiplicidade média dos *tie points* varia de 2,49 a 2,28 indicando que o aumento do número de *key points* por imagem não implica em maior número de *tie points* triangulados. Em média cada *tie point* está presente em 2,38 imagens o que inviabiliza o uso da filtragem por contagem das imagens.

O tempo de processamento cresce quase linear com o aumento de LdF apesar de não alinhar todas as imagens de entrada após LdF 120.000, consumindo unicamente tempo de processamento. Os degraus observados indicam a utilização progressiva de memória RAM por bloco de processamento, reflexo da automatização, incorrendo em tempos maiores ao final de cada bloco e descolando da linearidade, como para o limite LdF de 40.000 (Figura 55-B).

Figura 55 – Parâmetros pelo aumento do número de *key points* para alinhamento **Highest**: (A) relação entre número de *tie points* total, válidos e inválidos; e após filtragem manual da nuvem esparsa; (B) número de imagens alinhadas; (C) variação do erro de reprojeção médio e após filtragem manual; (D) variação do erro de reprojeção máximo e após filtragem manual; (E) acurácia das projeções, representado pelo tamanho médio dos *key points* e pós filtragem manual; (F) contagem das imagens, ou, multiplicidade dos *tiepoints* ; (G) tempo para alinhamento das imagens (utilizando Intel® Xeon® CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz, 3200MHz, 4 Núcleos, 12GB RAM, vídeo NVIDIA® GeForce® GTX 1080); Fonte: elaborado pelo autor (ASMS v.1.5.1).

Para a precisão de alinhamento *High*, o número de pontos homólogos válidos para o valor padrão de 40.000 de *key points* é de 172.994 pontos, atingindo patamar em torno de 387.690 pontos (com LdF em torno de 122.000). O patamar é decorrente da resolução das fotografias empregadas na análise (12MP), uma vez que o *software* não consegue encontrar mais feições por fotografia do que o permitido pela resolução, textura e contraste de cada fotografia. Isto, e a sobreposição utilizada, refletem diretamente na capacidade do algoritmo realizar as combinações dos *key points* para gerar a nuvem de pontos esparsa.

O comportamento em *High* indica que com imagens de resolução maior a curva de número de pontos encontra patamar em limites LdF maiores. Assim, até o LdF de 120.000, para o conjunto de dados de 2017, são encontradas feições únicas por imagem, em resolução original, sem a necessidade do *upscale* (Figura 56-A). O número de imagens alinhadas é acima de 150 para valores de limite acima de 40.000. O máximo alinhado neste teste é de 153, indicando que as duas imagens restantes têm problemas (vegetação, sem textura e contraste evidentes para identificação de feições significativas) apesar de apresentarem alta nitidez (Figura 56-B). Os erros de reprojeção médio e máximo têm valores estabilizados nos mesmos patamares de LdF (~120.000) em 0,54 e 31,26 pixels, respectivamente (Figura 56-C/D), também influenciados pela resolução das imagens, como esperado.

Os *key points* têm tamanhos médios em torno de 4,2 pixels e uma tendência de queda de 3,27 a 2,81 indicando melhoria da acurácia da projeção dos pontos (Figura 56-E). A multiplicidade de *tie points* varia de 2,54 até 2,42, com média de 2,5 imagens para cada ponto da nuvem esparsa de pontos (Figura 56-F). Com este valor médio, como para *Highest*, a aplicação do filtro de contagem de imagens, em seu limiar mínimo (2), não é possível, pois eliminaria a maioria dos *tie points* calculados com base em duas imagens, restando unicamente os pontos com projeções de 3 ou mais *key points*. Apesar disto aumentar a precisão dos pontos restantes o resultado seria a quebra do alinhamento do bloco fotogramétrico.

O patamar ocorre para o tempo de processamento de ~344s para LdF de ~120.000, uma vez que decorre do limite de identificação de feições e suas correspondências (Figura 56-B) dado pela resolução das fotografias utilizadas.

Figura 56 – Parâmetros pelo aumento do número de *key points* para alinhamento **High**: (A) relação entre número de *tie points* total, válidos e inválidos; e pós filtragem manual da nuvem esparsa; (B) número de imagens alinhadas; (C) variação do erro de reprojeção médio considerando variação da identificação de feições por imagem e pós filtragem manual; (D) variação do erro de reprojeção máximo e após filtragem manual; (E) acurácia das projeções, representado pelo tamanho médio dos *key points* e pós filtragem manual; (F) contagem das imagens, ou, multiplicidade dos *tiepoints* ; (G) tempo para alinhamento das imagens (utilizando Intel® Xeon® CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHZ, 3200MHz, 4 Núcleos, 12GB RAM, vídeo NVIDIA® GeForce® GTX 1080); Fonte: elaborado pelo autor (ASMS v.1.5.1).

A configuração *Highest* apresenta os valores médios e máximos de erro de reprojeção menores em relação à *High*, para cada limite de LdF. Isto é decorrente do aumento das dimensões das fotografias ao serem interpolados novos pixels com base nos vizinhos, por algoritmo próprio ao ASMS, gerando maior precisão e número de feições identificadas e de pontos homólogos decorrentes. No entanto, a interpolação das imagens, apesar do aumento do tamanho, reduz a qualidade e não adiciona detalhes, ou textura, além do já presente nas imagens, aumentando apenas o número de pixels, devendo ser usada para finalidades diversas às deste trabalho e com conjuntos de imagens muito nítidas, com contraste e textura marcantes. O controle da revelação RAW pode beneficiar o processamento em *Highest*, merecendo estudos específicos. Desta forma, a configuração *High*, que utiliza as imagens originais (não modificadas), foi utilizada nos processamentos subsequentes.

Os valores recomendados no manual do ASMS são bons parâmetros iniciais (40.000 LdF, 4.000 LPH) mediante o comportamento do número de pontos válidos e dos erros de reprojeção (para *Highest* e *High*), no entanto, outros valores podem ser adequados. Considerando a necessidade de alinhamento do maior número de imagens possível e o patamar alcançado em *High*, que representa o limiar de detecção para o conjunto de 2017, os parâmetros LdF e LPH foram definidos como 120.000 e 0, respectivamente. Outro motivo para aumentar LdF e LPH é o de limitar (ou diminuir) possíveis distorções geométricas (*bowl effect*), aumentando a precisão (reduzindo erro de reprojeção) dos pontos homólogos e sua densidade (Jaud et al., 2019).

Após esta análise inicial, foram filtradas, manualmente, as nuvens de pontos esparsas geradas em cada passo de LdF, por uma ferramenta de seleção dos pontos (*Model > Gradual selection...*), para minimizar erros da reconstrução 3D. Cada etapa de filtragem percorreu um intervalo seguida pelo ajustamento AFR com POI padrão.

Esta etapa foi criteriosa, pois poderia ocorrer a remoção de pontos válidos, em número suficiente, para quebrar o alinhamento de imagens com poucas projeções e removê-las das etapas posteriores (MVS, p. ex.) provocando perda de dados. Considerando isto, os valores dos limiares para filtragem da nuvem de pontos esparsa foram determinados manualmente, por tentativa e erro: erro de reprojeção até 0,3 pixel, incerteza da reconstrução entre 50 e 20, acurácia de projeção entre 7 e 5 e contagem de imagem não utilizada por ser muito restritiva. Esta aplicação resultou em nuvens esparsas com menor erro de reprojeção médio (Figura 55-C e Figura 56-C).

Para *Highest*, em termos de erro de reprojeção médio, desde o início os valores se estabilizam ao redor de 0,24 pixels para 40.000 de Limite de *Key points*, em ligeiro decréscimo até 0,23 para 300.000 de *Key points*. Mesmo comportamento ocorre quando são analisados os valores de erro de reprojeção máximo, estabilizados ao redor de 1,80 pixels, eliminando o comportamento anterior entre 107.000 e 178.000. O número de pontos válidos menor, com inválidos maiores, reflete a exclusão dos pontos de maior erro pela filtragem manual (Figura 55-A/C/D).

A filtragem manual também diminui os erros internos de *High* (Figura 56-A/C/D), estabilizando os valores de erro de reprojeção médio e máximo a partir do mesmo patamar antes identificado, sendo possível utilizar valores maiores do que os recomendados no manual de usuário do *software* (LdF de 40.000 e LPH de 4.000), desde que a filtragem seja realizada.

Com estas considerações, foi elaborado um programa em Python para automatizar o processamento das aquisições de 2017 e 2019 com intuito de minimizar eventuais diferenças produzidas por processamento manual, possibilitando a geração de nuvens de pontos esparsas com alinhamento (estrutura e movimento) com menor erro de reprojeção médio possível. As nuvens densas foram geradas em seguida e utilizadas nas etapas antecedentes à detecção de movimentos (Figura 57, Tabela 25 e Apêndice B).

Tabela 25 – Descrição dos principais comandos Python aplicados no programa.

Função / Método	Descrição
<code>addPhotos()</code>	Adiciona as imagens ao projeto do ASMS.
<code>estimateImageQuality()</code>	Estima a nitidez (<i>sharpness</i>) das imagens.
<code>Calibration()</code>	Carrega arquivo de calibração da câmera.
<code>getVPD()</code>	Calcula o deslocamento vertical do pixel.
<code>sensor.rolling_shutter</code>	Habilita a compensação do <i>rolling shutter</i> dependendo de <code>getVPD()</code> .
<code>matchPhotos()</code>	Detecção de feições nas imagens e sua correspondência. Pode ser aprimorado em caso de calibração inicial da câmera.
<code>alignCameras()</code>	Alinhamento das imagens pela estimativa da estrutura e posição das câmeras (<i>SfM</i>).
<code>optimizeCameras()</code>	Melhoria da estrutura e dos parâmetros internos (AFR).
<code>PointCloud.Filter()</code>	Filtragem da nuvem de pontos com valores para incerteza da reconstrução, reprojeção, acurácia da projeção e contagem de imagens.
<code>buildDepthMaps()</code>	Geração das imagens dos mapas de profundidade.
<code>buildDenseCloud</code>	Geração da nuvem densa por MVS utilizando mapas de profundidade.
<code>exportPoints()</code>	Exporta nuvem de pontos (esparsa ou densa) como produtos.

Fonte: https://www.agisoft.com/pdf/metashape_python_api_1_5_1.pdf.

Figura 57 – Fluxograma do programa Python inserido no ASMS v.1.5.1 para automatização do processamento das fotografias aéreas obtidas nas aquisições de 2017 e 2019 (Apêndice B).

O programa é iniciado com a entrada de parâmetros e localização dos diretórios de arquivos essenciais (imagens aéreas, calibração da câmera, parâmetros do sensor e do voo e pontos de controle e verificação) e, então, o processamento segue automático (mudança de sistema de coordenadas, p. ex.). Além da calibração da câmera (Arquivo 1), os arquivos gerados em formato *.txt seguem o padrão para leitura do programa Python para ambas as aquisições:

```

1. # Arquivo 2: Parâmetros do sensor e do voo (Phantom 4 / 2017)
2. # SH(mm),FR(mm),IH(pixels),ST(ms),FH(m),VE(m/s)
3. 4.73496969,3.6099999,3000,33,50,5.0
4.
5. # Arquivo 3: Pontos de apoio e quais são de controle
6. # pt_apoio,x,y,z,acur_x,acur_y,acur_z,controle
7. BP1_113,316689.126,7405083.739,918.390,0.004,0.004,0.006,1
8. BP1_114,316675.449,7405032.799,939.968,0.004,0.004,0.005,1
9. BP1_115,316644.657,7405070.101,930.179,0.004,0.004,0.005,1
10. BP1_116,316625.532,7405060.236,937.857,0.004,0.004,0.005,0
11. BP1_117,316560.674,7404971.095,1017.140,0.003,0.003,0.008,1
12. BP1_134,316487.454,7405050.101,1021.989,0.003,0.003,0.006,1
13. BP1_139,316520.902,7405004.202,1016.312,0.004,0.004,0.008,0
14.
15. # Arquivo 4: Lista de coordenadas 2D dos alvos nas imagens
16. # pt_apoio,nome_imagem,img_x,img_y
17. BP1_113,DJI_0027,471.9340,577.7640
18. BP1_113,DJI_0028,208.5690,1131.4301
19. ...

```

As imagens passam por um controle de qualidade em função do cálculo de sua nitidez onde imagens com valores menores que 0,70 são automaticamente desabilitadas do processamento. Antes do alinhamento é calculado o deslocamento vertical do pixel na imagem (*vertical pixel displacement*, VPD) para realizar, ou não, a compensação do obturador por varredura (*rolling shutter*), como a câmera FC330 do RPA DJI Phantom 4. O VPD (Equação 7) envolve a distância focal (*FR*), altura do sensor (*SH*) e da imagem (*IH*), tempo de leitura do sensor (*ST*), altura média de voo sobre o solo (*FH*) e velocidade média da plataforma (*VE*). O recomendado para compensar o efeito é para valores de VPD maiores que 2 pixels, dependente da velocidade do plataforma e altura de voo (

Tabela 26) (Pix4D, 2019).

$$VPD = \left(\frac{ST}{1000} \right) \times \left(\frac{VE}{FH} \right) \times \left(FR \times \frac{IH}{SH} \right) \quad \text{Equação 7}$$

A modelagem da câmera iniciou da calibração prévia fornecida (modelos C e B, para restringir os parâmetros da autocalibração), utilizando as imagens aéreas e pelo ajustamento por feixe de raios (AFR) realizado automaticamente no alinhamento inicial (identificação, filtragem e correspondência de *tie points* e *SfM*, com autocalibração), com recuperação da orientação exterior e interior.

O AFR posterior (ferramenta *Optimize*) considera os *tie points* disponíveis e suas mudanças (filtragem da nuvem esparsa), os dados de posição e referência (das

imagens, dos pontos de controle e dos pontos de amarração manual), utilizando-os para refinar as estimativas da posição das câmeras (entre elas e no sistema de coordenadas – orientação externa) e os parâmetros de orientação interior. O AFR é uma transformação não linear aplicada ao modelo para refinar os ajustes, restringir a solução por meio dos pontos de controle, ou outros, e contornar problemas da nuvem de pontos, como a distorção dômica (*bowl effect*) e de georreferenciamento. O AFR, pós-alinhamento, considera os dados dos pontos de controle, mesmo que, para prevenir o efeito dômico, tenha sido realizada a calibração prévia da câmera e, se possível, desabilitando as coordenadas das imagens, obtidas por GNSS de navegação, para obter maior precisão dos pontos 3D em relação ao mundo real.

A transformação linear (ferramenta *Update*) não afeta as posições recuperadas entre as câmeras e foi aplicada após a inserção dos pontos de controle com coordenadas, transformando o modelo por meio de translação, escala e rotação (sete parâmetros), aproximando a nuvem calculada dos pontos medidos (pontos de apoio).

O AFR foi inserido durante as etapas de remoção de pontos e em um ajustamento final para aprimorar a geometria da cena com os pontos de menor erro de reprojeção médio. Para melhorar o tempo de processamento necessário à geração das nuvens densas, para cada projeto, depois das etapas anteriores, foi realizado o ajuste da região de processamento (*bounding box*). Em seguida, foram geradas e exportadas as nuvens densas em formato LAS/LAZ.

Tabela 26 – Efeitos da altura sobre o solo e velocidade da plataforma sobre o VPD.

Câmera Eletrônica de Varredura FC330 (P4)			
IH (pix)	SH (mm)	FR (mm)	ST (ms)
3000	4,73	3,61	33
VE fixa (m/s)		FH fixa (m)	
7,0		100,0	
FH (m)	VPD (pix)	VE (m/s)	VPD (pix)
30,0	17,61	1,0	0,75
40,0	13,21	2,0	1,51
50,0	10,57	3,0	2,26
60,0	8,81	4,0	3,02
70,0	7,55	5,0	3,77
80,0	6,60	6,0	4,53
90,0	5,87	7,0	5,28
100,0	5,28	8,0	6,04
110,0	4,80	9,0	6,79
120,0	4,40	10,0	7,55

Fonte: elaborado pelo autor; <http://www.pix4d.com/blog/rolling-shutter-correction>.

6.8 Processamento SfM-MVS

Os parâmetros de entrada foram: (a) precisão de alinhamento alta (*High*), (b) LdF: 120.000, (c) LPH: 0, (d) pré-seleção de pares de imagens por georreferenciamento; Arquivos de calibração (FC330 e FC6310) como ponto de partida da autocalibração; Pontos de controle e verificação corrigidos com efemérides finais; Filtragem com limiares: de até 0,3 pixel para erros de reprojeção; 20 para incerteza de reconstrução; 6 para acurácia de projeção e contagem de imagens não utilizada (alta multiplicidade dos pontos aumenta a precisão do AFR e mitiga a acumulação de erros aleatórios na reconstrução).

Com o programa Python (Apêndice B) foram geradas as nuvens densas para as aquisições de 2017 e 2019, após filtragem automática das nuvens esparsas para melhoria de suas precisões internas (Tabela 27 e Figura 58). Inicialmente, para 2017 foram alinhadas 152 imagens de 155 (98%) resultando em nuvem esparsa de 425.337 pontos, que pela filtragem decresceu em etapas até 310.451 pontos, mantendo as 152 imagens. De 2019, 480 de 484 imagens foram alinhadas resultando em nuvem de 937.639 pontos que decresceu até 550.097 pontos e em 462 imagens (95,4%).

As imagens não alinhadas inicialmente (DJI_0122 e DJI_0123 de 2017; DJI_0080, DJI_0081, e outras de 2019) são decorrentes de baixo número de feições identificadas, ou da falta de correspondências válidas suficientes (Figura 59-A), associadas às áreas de cobertura vegetal de porte arbóreo, que têm falta de texturas distintas e que podem ser imageadas em movimento (vento, p. ex.).

As imagens alinhadas com maiores erros de reprojeção RMSE também são decorrentes de cobertura de vegetação, como as DJI_0113, DJI_0124 de 2017 e DJI_0135, DJI_0331 de 2019 (Figura 59-B). Apesar da remoção destas imagens ser recomendada (James et al., 2017a, b) elas foram mantidas por não alterarem significativamente os erros de reprojeção médios do bloco fotogramétrico.

A filtragem também remove os pontos de maior erro sem excluir as imagens do processamento (caso tenham mais de 100 projeções). A exclusão de imagens pela filtragem ocorreu apenas no conjunto de 2019 reduzindo as iniciais 484 para 462.

O erro de reprojeção médio foi de 0,51 para 0,35 pixel (~31%) e de 0,88 para 0,38 pixel (~57%), respectivamente para 2017 e 2019. Os erros máximos também diminuíram ao longo das etapas de filtragem de 21,27 pixel para 3,57 pixel (~83,21%) em 2017 e de 48,76 para 2,58 pixel (~94,7%) em 2019. Na distribuição espacial os

maiores valores estão associados a vegetação. A filtragem diminuiu a variância e o coeficiente de variação dos erros de reprojeção das nuvens esparsas (Figura 60).

Figura 58 – Aquisição 2017: (A) sobreposição das imagens e posição das câmeras; (B) Localização dos pontos de apoio: controle e verificação com as respectivas estimativas de erros; (C) Vista 3D da nuvem densa com os pontos de apoio e posições das câmeras. Aquisição 2019: (D) sobreposição das imagens e posição das câmeras; (E) Localização dos pontos de apoio: controle e verificação com os respectivos de erros; (F) Vista 3D da nuvem densa com os pontos de apoio e posições das câmeras.

Tabela 27 – Sumário dos resultados dos processamentos para as aquisições de 2017 e 2019.

	Imagens	Pontos	Etapas*	A**	B**	C**	D**	E**	σ_0 **	G**	H**
2017	152/155 (98,0%)	445.434	0	426.278	4,20	2,47	0,51	21,30	-	10,82	9,10
			1	426.278	4,20	2,47	0,51	21,23	0,116	0,49	0,92
			2	346.437	4,26	2,47	0,53	21,21	0,115	0,46	0,94
			3	312.185	3,26	2,47	0,36	4,54	0,117	0,46	0,92
			4	310.965	3,26	2,47	0,35	4,54	0,116	0,43	0,70
			5	310.965	3,26	2,47	0,35	4,52	0,327	0,89	2,08
2019	462/484 (95,4%)	999.197	0	940.476	4,58	2,64	0,76	35,83	-	11,04	15,69
			1	940.476	4,58	2,64	0,76	35,83	0,160	4,18	4,56
			2	736.352	4,78	2,64	0,81	37,68	0,157	4,21	4,41
			3	606.792	2,96	2,64	0,46	4,02	0,167	4,18	4,30
			4	545.959	3,00	2,64	0,38	2,70	0,142	3,22	3,09
			5	545.959	3,00	2,64	0,38	2,62	0,365	4,22	4,78

* Etapas SfM-MVS: (0) nuvem esparsa após alinhamento inicial com transformação linear por pontos de controle; (1) com AFR e pontos de controle; (2) após filtragem da incerteza da reconstrução e AFR; (3) após filtragem de acurácia de projeção e AFR; (4) após filtragem de erro de reprojeção e AFR; (5) ajustamento AFR final com pesos referenciados pelos erros de reprojeção médio e dos pontos de controle nas coordenadas das imagens.

** A = nuvem esparsa (pts); B = Tamanho médio das Feições (pix); C = Contagem Média de Imagens; D = Erro de Reprojeção Médio (pix); E = Erro de Reprojeção Máximo (pix); σ_0 = Standard Deviation of Unit Weight (pix); G = Erro nos Pontos de Controle (cm); H = Erro nos Pontos de Verificação (cm).

Os ajustamentos AFR inicial (de alinhamento) e intermediários (durante filtragens, restringido pelos pontos de controle e estatisticamente) foram inicialmente configurados com (pesos) precisão de coordenadas das imagens (*image coordinates accuracy*) padrão ASMS de 1,0 pixel para pontos homólogos (*tie point accuracy*), 0,10 pixel para os pontos de controle (*marker accuracy*) e de 0,005 m para a precisão de medidas (*measurement accuracy*) dos pontos de controle (*marker accuracy*).

Figura 59 - (A) Exemplo de par de imagens excluídas do processamento (sem número suficiente de feições, ou correspondências válidas). (B) Imagens com erros residuais elevados. As imagens estão escurecidas para visualização dos pontos.

Figura 60 – Distribuição espacial dos erros de reprojeção por pontos das nuvens esparsas para 2017 e 2019 e histogramas comparativos dos erros por ponto da filtragem automática.

Os valores de $\hat{\sigma}_0$ (sigma0 – *Standard Deviation of Unit Weight*) de 0,11 pixel para 2017 e 0,14 pixel para 2019 indicam um desbalanceamento dos pesos das observações dos pontos homólogos e dos pontos de controle. Este parâmetro é relacionado ao ajuste por mínimos quadrados do AFR refletindo na precisão interna (espaço imagem) das coordenadas dos pontos e indicando como o modelo matemático AFR se ajusta aos dados (Tabela 28), porém, sozinho não é um bom indicador da precisão dos dados já que, geralmente, quanto maior número de POIs adicionais menor o valor de $\hat{\sigma}_0$ e o excesso de POIs provoca sobreajuste (modelo se ajusta também aos erros).

Para balancear as observações dos pontos homólogos e dos pontos de controle em um ajustamento AFR final foram atribuídos pesos com base nos valores dos erros de reprojeção médio das imagens e pontos de controle (James et al., 2017a, b). Os pesos de 2017 foram de ~0,35 pixel para os pontos homólogos e ~0,10 pixel para os pontos de controle e, respectivamente de ~0,38 pixel e ~0,11 pixel para 2019, que resultaram em $\hat{\sigma}_0$ de 0,32 e 0,36 pixel para 2017 e 2019, respectivamente.

As medições dGNSS dos pontos de apoio coletados em 2017 não excederam precisão de 1,0 cm (em X, Y e Z) e em 2019 de 2,0 cm (em X e Y) e 4,0 cm (em Z), configuradas com precisão de medidas (padrão ASMS) de 0,005 m (*marker accuracy*).

Durante a inserção inicial dos pontos de apoio de 2019, o ponto BP2_03 apresentou erro de reprojeção alto, sendo excluído do processamento. Para 2017 todos os pontos de apoio foram inseridos com sucesso.

A configuração adotada dos pontos de apoio (número de pontos de controle e verificação) em conjunto com a ponderação das observações dos pontos de apoio e homólogos resultou em valores médios RMSE dos pontos de verificação de 2,08 cm (2) para 2017 e de 4,78 cm (3) para 2019, indicativos das distâncias médias das nuvens de pontos para o mundo real (medido pelo dGNSS), e dos pontos de controle de 0,89 cm (5) e 4,22 cm (5), respectivamente (Tabela 28).

Para um mesmo sensor e conjunto ótico (lente), os valores RMS dos pontos de apoio podem variar conforme GSD, condições de iluminação, levantamento GNSS (precisão das medidas, condições ambientais, posição das coletas, geometria da rede de controle/verificação formada, soluções de correção da posição RTK, PPK e das efemérides) e processamento SfM (em especial da marcação dos pontos nas imagens e, assim, do GSD e tamanhos dos alvos).

A melhoria da solução da reconstrução 3D pelo ajustamento AFR com pontos de controle (com coordenadas) somado à filtragem de pontos resultaram em acurácias progressivamente melhores (mm) das nuvens esparsas (melhor precisão interna, georreferenciamento e mais próximas do mundo real). O ajuste das observações (com aumento destes valores) traz essa precisão mais próxima da realidade de um levantamento fotogramétrico *survey grade* (James et al., 2017a).

Tabela 28 – Valores dos erros RMSE para os pontos de controle e de verificação: 2017 e 2019.

Ano	Ponto	Nome	Erro X (cm)	Erro Y (cm)	Erro Z (cm)	Erro Total (cm)	Imagem (pix)	Projeções observações
2017 (7)	Controle (5)	BP1_113	0,58	0,70	-0,91	1,28	0,17	17
		BP1_114	-0,13	0,20	-0,07	0,25	0,17	10
		BP1_115	-0,47	-1,03	0,83	1,41	0,24	10
		BP1_117	-0,06	0,02	-0,51	0,51	0,15	4
		BP1_134	0,07	0,05	-0,02	0,09	0,24	13
		Total	0,34	0,57	0,60	0,89	0,20	54
	Verificação (2)	BP1_116	0,31	0,32	-1,20	1,29	0,25	12
		BP1_139	0,04	-0,27	-2,63	2,65	0,13	13
		Total	0,22	0,30	2,05	2,08	0,19	25
2019 (8)	Controle (5)	BP2_01	1,43	-2,23	-3,32	4,25	0,31	19
		BP2_04	6,04	-1,55	-2,33	6,66	0,29	23
		BP2_05	-3,59	-0,76	-1,27	3,89	0,30	24
		BP3_01	0,03	1,82	-2,22	2,87	0,24	24
		BP3_04	-0,12	-0,96	1,54	1,82	0,29	4
		Total	3,21	1,56	2,25	4,22	0,28	94
	Verificação (3)	BP2_02	1,55	3,48	-0,36	3,83	0,30	17
		BP3_02	-1,41	-0,03	-6,23	6,39	0,16	8
		BP3_03	-0,04	-0,68	-3,57	3,64	0,23	10
		Total	1,21	2,05	4,15	4,78	0,26	35

Fonte: projetos das aquisições 2017 e 2019 no ASMS v.1.5.1.

Figura 61 – (A) Segmentação das bordas das nuvens e (B) filtragem *low noise*: pontos destacados abaixo da superfície de referência são provenientes de ruídos da reconstrução MVS.

Os potenciais erros sistemáticos embutidos nos dados por conta da variação espacial das precisões dos pontos são mitigados pela identificação de imagens, pontos homólogos e pontos de apoio discrepantes, utilização apropriada de modelos das câmeras e ponderação correta para as precisões dos pontos homólogos e pontos de controle medidos nas imagens para uso no ajustamento AFR (James et al., 2017a).

Os projetos ASMS foram duplicados, com configurações e somente com as nuvens esparsas, para extração das estimativas de precisão por ponto. Os resultados foram processados no *software open source* *sfm_georef* para interpolação dos mapas de precisão a serem incorporados no algoritmo M3C2 utilizado na detecção de mudanças (James et al., 2017a, b).

As nuvens de pontos densas do processo de MVS sobre as nuvens esparsas resultaram em 282.626.750 pontos para 2017 e 1.205.576.841 pontos para 2019. Foi realizada a remoção de pontos discrepantes pelo filtro *Statistical Outlier Removal* (*CloudCompare* > *SOR*) e segmentadas de suas bordas (áreas sujeitas a maiores erros e distorções por menor multiplicidade de pontos e falta de sobreposição lateral) (Figura 58-A/D). A segmentação foi por meio de uma área comum (*shapefile*) entre as aquisições (Figura 61-A) resultando em 162.772.719 e 377.886.935 pontos, respectivamente, para 2017 e 2019.

6.9 Processamento LiDAR – ALS

Os dados LiDAR das folhas disponibilizadas (Figura 62) foram processados para resultar em uma nuvem única, limpa de pontos espúrios e segmentada pela cobertura da área de estudo, considerando um *buffer*. Este procedimento foi realizado utilizando diversas ferramentas do LAStools, nas seguintes etapas: (1) junção (*merge*) das folhas 1:1.000 e definição da projeção para SIRGAS2000 UTM 23S, resultando

em arquivo de 34.395.088 pontos (*lasmerge*), (2) segmentação em 179 células quadradas (*tiles*) de 150 metros de lado e *buffer* de 30 metros, resultando em arquivos com menos de um milhão pontos para facilitar o processamento (*lastile*), (3) classificação por célula dos pontos por elevação (*lassort*), (4) seleção das células referentes a área de estudo, considerando um *buffer* de uma célula de lado, (5) remoção de pontos duplicados (mesmas coordenadas) provenientes da distribuição em folhas (*lasduplicate*), (6) remoção do *buffer* das células (*lastile*), (7) junção das células (*tiles*) resultando na nuvem de pontos com todos os retornos (*lasmerge*) e (8) extração dos pontos classificados como solo (*las2las*).

A nuvem resultante de (7), com todos os retornos, tem 3.384.389 pontos, espaçamento de 0,22 m e densidade de 21,15 pontos/m², com limites em X (316.400, 316.800 m) e Y (7.404.900, 7.405.300 m) cobrindo ca. 160.000 m². Foi realizada filtragem de pontos espúrios (*CloudCompare > Clean > Statistical Outlier Removal-SOR*) com fator multiplicador (*nsigma*) de três desvios padrão, para remover os pontos mais distantes da média, reduzindo a nuvem a 3.312.000 pontos.

Na etapa (8) foi segmentada a classificação fornecida pela PMSP, realizada em *software* comercial, para utilizar a nuvem de pontos correspondente aos retornos de solo. Esta nuvem apresentou 250.518 pontos com espaçamento de 0,73 m e densidade de 1,90 pontos/m², com a mesma cobertura da nuvem gerada em (7).

Esta nuvem foi utilizada para reconstruir e modelar uma superfície (9) por Poisson (Kazhdan et al., 2006; Kazhdan e Hoppe, 2013), em configuração padrão (*CloudCompare > Plugins > PoissonRecon*) para cálculos de distâncias entre nuvens e modelos (*mesh*) C2M. Esta superfície, como seus pontos originários, é relativa à superfície do terreno (*bare ground*).

Para avaliar a classificação de (8) foi realizada a conversão de (7) por uma malha regular (Figura 63) para extração dos pontos de menor elevação e mais próximos ao centro de cada célula da malha (utilizando *CloudCompare > Rasterize*). Este procedimento (10) gerou uma nuvem com os retornos do solo, espaçada com o valor das células da malha, por filtragem por blocos mínimos. Foram avaliados valores de célula entre 1 e 10 m, sendo escolhido 5 m, que por avaliação visual cuidadosa foi realizada remoção manual de pontos, resultando em 6.260 pontos.

Figura 62 – Articulação dos dados e nuvem de pontos ALS resultante da etapa (1) de processamento.

O cálculo das distâncias (Figura 63) entre as nuvens (8) e (10), desprezando uma borda de ~30 m pela possibilidade de conter erros nas distâncias calculadas, resultou em uma distância média de $0,045 \pm 0,15$ m (C2C-HM). Já entre a superfície (9) e a nuvem (10) a distância média foi de $0,025 \pm 0,27$ m (C2M), duas vezes e meia o valor da precisão dos pontos (de 0,01 m). O cálculo por C2M considera as distâncias acima abaixo da superfície modelada de referência, sendo mais próxima à realidade. Por estes valores, a nuvem de pontos (8) e sua superfície modelada (9), com retornos do solo provenientes de classificação em *software* comercial e fornecida pela PMSP, foram consideradas válidas como referência para as nuvens SfM.

A nuvem (8) tem maior densidade em áreas de vegetação rasteira e solo exposto, incluindo os movimentos de massa, coincidente com pontos com um retorno.

Estudos futuros podem compreender o emprego de diferentes algoritmos de filtragem e classificação de pontos de solo, com comparação com a nuvem (9), tais como o MCC e o CSF que têm bom desempenho em áreas de topografia complexa, com cobertura vegetal, tal como as encostas do Morro Doce.

Em inspeção visual 3D das nuvens (7) e (8) foi possível identificar as feições de instabilidade associadas aos movimentos de massa, tais como as coroas de deslizamentos e suas cicatrizes, assim como caminhos preferenciais para o escoamento de águas pluviais que se traduzem em erosões (Figura 64).

Figura 63 – Vista 3D dos produtos gerados LiDAR-ALS e das distâncias entre a nuvem classificada originalmente (8), uma superfície gerada a partir dela (9), e uma nuvem de pontos gerada por filtragem por blocos mínimos com lado de 5m (10).

A maioria das formas (das feições identificadas) são suavizadas, com exceção das cicatrizes C1 e C2 marcadas no relevo (topografia), indicando um cenário em que as intempéries (principalmente erosão) atuaram nos deslizamentos e cicatrizes (como na Figura 15-A).

Figura 64 – Vista 3D das feições de instabilidade identificadas por inspeção visual de dados 3D, coloridos artificialmente por altura, provenientes de LiDAR-ALS classificados como solo (*bare ground*) na encosta do Morro Doce, São Paulo (SP).

Os depósitos de acumulação de encosta, mencionados na revisão bibliográfica e identificados em campo, corroboram com as feições identificadas nos dados LiDAR-ALS, além das reativadas (C1 e C2). Estes depósitos formados por acumulação de blocos de rocha provenientes de quedas, tombamentos e rolamentos, espalhados em superfície em meio a colúvio, desenvolvido por movimentos lentos, erosão e deslizamentos, e solo coluvionar, puderam ser inferidos pela integração dos dados LiDAR-ALS (morfologia), em conjunto com as observações geológico-geotécnicas expeditas de campo e dados subsuperficiais (sondagens) (Figura 65).

As feições identificadas (com exceção de C1 e C2) não têm registro histórico recente (Defesa Civil Distrital, ou relato de moradores, até nosso conhecimento), ou identificação visual em fotos aéreas e imagens de satélite históricas (que remontam até o ano de 1954).

A cicatriz C2 é a mais evidente nos dados por suas dimensões e forma característica (alongada). Todas as feições foram identificadas por suas formas características, de coroas circulares, expressivas na visualização 3D. A extensão desta área na encosta foi utilizada para balizar as segmentações nas nuvens SfM-MVS geradas, cobrindo a região mais suscetível a movimentos de massa (maior número de feições de instabilidade e maior declividade).

Os dados LiDAR-ALS, referência para os demais, balizaram a filtragem para obtenção dos pontos relativos ao solo das nuvens SfM-MVS, inclusive ao refinar os resultados obtidos pelo algoritmo de filtragem utilizado (CSF).

Figura 65 – Depósito de acumulação de encosta inferido em planta (sobre nuvem de pontos colorido por altura) e perfil A-A' com retornos do solo e da superfície.

6.10 Filtragem das Nuvens SfM-MVS

Em complemento à filtragem SOR, utilizando a superfície (9) *mesh* gerada (LiDAR-ALS) no item anterior, foi realizado cálculo C2M (C2C-HM não resulta em distâncias assinaladas). Os resultados foram utilizados para remoção dos pontos *low noise* (gerados no MVS em áreas de vegetação densa, corpos d'água etc.) e localizados com distâncias maiores que 0,5 m (2017) e 0,30 m (2019) abaixo da superfície. Esta remoção facilitou a filtragem de pontos pelo CSF (Figura 61-B).

Em 2017, a encosta do Morro Doce sofreu incêndio, o que facilitou a exposição do solo às imagens aéreas (e geração de pontos de solo). Porém, do topo à ocupação abaixo, a encosta ainda apresentou mata densa nativa, vegetação arbustiva fechada e gramíneas altas (onde não afetadas) e, parcialmente a meia encosta, mata residual densa seguida de eucaliptos plantados para proteção de eventuais quedas de blocos. Entre 2017 e 2019 não houve novos incêndios, ocorrendo a recuperação da vegetação, arbustiva e arbórea, e dificultando a geração de pontos de solo em 2019.

Por esta configuração de vegetação e terreno complexo, considerando que o SfM-MVS gera os pontos de superfície e não de solo, as nuvens foram segmentadas para extrair a área dos movimentos de massa visíveis e identificáveis nas nuvens de pontos SfM-MVS, com base no identificado nos dados LiDAR-ALS (Figura 64). As cicatrizes mais recentes (C1 e C2) destacaram-se nas nuvens pelo solo exposto (cores RGB) e formas típicas de deslizamentos planares (Figura 66).

Para a primeira extração de pontos de solo foi utilizado o CSF (*CloudCompare > Plugins > CSF Filter*). Pela complexidade do terreno (árvores, arbustos, desníveis abruptos produzidos pelos movimentos de massa e presença de blocos de rocha) as nuvens foram novamente segmentadas para adoção de parâmetros diferentes por segmento de nuvem. Os parâmetros foram definidos para encosta e terrenos íngremes, com resolução do tecido simulado variando entre 0,2 e 0,5 m e limiar de classificação entre 0,1 e 0,2 m, dependendo do trecho segmentado, produzindo bons resultados, porém ainda mesclando pontos *ground* e *off-ground*.

Em seguida, também nas distâncias C2M, foram excluídos progressivamente os pontos, em análise visual cuidadosa, com distâncias calculadas maiores que $\pm 0,50$, $\pm 0,40$ e $\pm 0,30$ m em relação à superfície de referência, sempre observando o efeito desta filtragem para não excluir os pontos de solo. Desta forma, restaram apenas os pontos mais próximos do terreno.

Figura 66 – Nuvens de pontos com cores RGB de 2017 e 2019 cobrindo área com feições de instabilidade (indicadas com traços verdes) e blocos e afloramentos rochosos (indicados).

Para melhorar os resultados foram realizadas remoções manuais dos pontos residuais relacionados à vegetação utilizando como critério as cores RGB associadas, as morfologias características da vegetação presente na área, representadas na distribuição espacial dos pontos e nas distâncias calculadas. Por último, foram inseridos de volta os pontos relacionados aos blocos de rocha removidos anteriormente pela filtragem do algoritmo ou pela distância à referência.

Como esperado as nuvens resultantes do processo de filtragem ficaram com espaços (“buracos”) onde havia vegetação (Figura 67). Porém, o algoritmo de detecção de mudanças 3D M3C2 permite, para dados sobrepostos (superfícies de cisalhamento dos deslizamentos, com solo exposto, p. ex.), o cálculo das distâncias e os intervalos de confiança (limite de detecção), deixando em cinza (ou sem cor) os locais sem pontos correspondentes na nuvem comparada.

Figura 67 – Nuvens resultantes da filtragem combinada entre algoritmo CSF, por distâncias C2M (dados SfM para os LiDAR-ALS) e manual para extração dos pontos de solo.

A filtragem foi verificada por meio de perfis selecionados, nas áreas das cicatrizes C1 e C2 (Figura 68), e extraídos das nuvens de pontos original e filtrada. Em alguns trechos a vegetação superficial não permitiu a obtenção de nenhum ponto de solo, porém, as superfícies de cisalhamento (solo exposto) ficaram bem marcadas.

6.10 Detecção de Mudanças

O limite de detecção depende do erro de registro entre as nuvens (distâncias menores que este limite representam mudanças não significativas). Se os pontos de controle entre as aquisições fossem os mesmos o erro de registro tenderia a zero, assim, o limite de detecção seria vinculado apenas à variação local (rugosidade), ou às precisões dos pontos (variabilidade das coordenadas). Como foram adotados pontos de controle distintos para 2017 e 2019 foi necessário o cálculo deste erro.

Figura 68 – Diferentes perfis para as cicatrizes C1 (esquerda) e C2 (direita), dos anos de 2017 e 2019, comparando a classificação de pontos de solo (*ground*) e não solo (*non-ground*), vegetação, p.e.

As nuvens foram segmentadas para extração de áreas consideradas estáveis (sem mudanças) no período entre aquisições, como os afloramentos e blocos de rocha, naturalmente menos suscetíveis a movimentações (sem histórico no período), adjacentes aos movimentos de massa (Figura 69).

Figura 69 – Erro de registro entre as nuvens de 2017 e 2019: média de $4,93 \pm 2,9$ cm para nove áreas consideradas estáveis entre as aquisições de dados SfM.

O cálculo C2C-HM resultou em uma distância média de $4,93 \pm 2,90$ cm em 30.450 pontos comparados. Por motivos conservadores, esta medida foi arredondada para 5,0 cm e, para fins de entrada no M3C2, considerada isotrópica e espacialmente uniforme para toda a área coberta pelas nuvens (Figura 69). Assim, nenhuma variação (distância medida entre nuvens) até 5,0 cm é considerada significativa, dependendo também das variações espaciais da rugosidade (limite detecção M3C2). O resultado é próximo da soma em quadratura dos erros dos pontos de verificação (5,21 cm).

Figura 70 – Vista 3D das incertezas das distâncias calculadas pelo M3C2 e a variação das normais.

Na utilização do M3C2, a nuvem de 2019 foi definida como a comparada (nuvem #2) e a de 2017 como a de referência (nuvem #1). O intervalo definido para busca da escala das normais foi entre 1,0 e 3,0 m, espaçado de 0,2 m, por ponto núcleo, para estabelecer a superfície mais plana (onde a normal fica menos variável às mudanças topográficas) (Figura 70). A escala do cilindro de projeção foi definida em 0,5 m, suficiente para englobar os 20 pontos necessários. A profundidade máxima do cilindro de projeção foi definida em 2,0 m (superestimada já que no período considerado não foram identificadas movimentações perceptíveis visualmente). Os pontos núcleo foram definidos como todos os pontos da nuvem #1 (3.818.468 pontos).

Os afloramentos e blocos de rocha, utilizados como marcadores do erro de registro, não acusaram mudança, como esperado (ou, abaixo do limite de detecção). Dentre as feições de instabilidade, as duas identificadas (C1 e C2) foram destacadas na visualização das distâncias (Figura 71) por suas superfícies de ruptura quase planas, com mudanças significativas em pequenas áreas de solo exposto.

Na feição de instabilidade C1, a porção superior apresentou um decréscimo de ~40 cm (cor azul, p. ex.), que, em teoria, confirmou o tipo proposto para o movimento de massa (deslizamento), então identificado, como ocorrido no período entre as aquisições. O material deslizado, em pequeno volume, teria sido acumulado no corpo de tálus, a jusante, em meio à vegetação arbustiva densa e não detectável pelo M3C2 (considerando também o tipo de dado utilizado).

A feição C2, do deslizamento reativado em 2009 e 2012, mais significativa, apresenta uma série de pequenos acréscimos e decréscimos. As distâncias positivas (cor vermelha, p. ex.) foram, possivelmente, resultantes de pontos não filtrados relativos à vegetação (borda superior da feição indicando acréscimo de ~50 cm). O centro da feição, de pequena área em decréscimo, foi considerado uma mudança significativa pelo algoritmo M3C2, mas que foi também interpretada como resultante de interferências da vegetação na relação distância e rugosidade local.

Figura 71 – Vista 3D das distâncias M3C2 calculadas e se houve mudanças significativas de acordo com variação espacial da rugosidade local e o erro de registro de 5 cm.

Estas mudanças detectadas não são compatíveis com os registros históricos (da Defesa Civil) no período entre as aquisições de dados de 2017 e 2019. Apesar da filtragem das nuvens, por um combinado de técnicas para aprimorar o resultado, ainda houve pontos provenientes da vegetação (gramíneas altas) dificultando o processo do cálculo das distâncias M3C2. Ademais, os vazios nas nuvens comparadas dificultaram a interpretação do campo de mudanças significativas. A densidade de pontos, mesmo após filtragem, permitiu a utilização de escalas M3C2 de projeção e normal menores, contudo, incorporou uma incerteza maior no cálculo, mesmo com o nível de confiança local, marcando mudanças por pontos *non-ground* ainda presentes nas nuvens.

A variante M3C2-PM melhorou os resultados M3C2 obtidos, por meio da estimativa das precisões em X, Y e Z para cada ponto das nuvens (pelo cálculo da variabilidade espacial dos pontos), em detrimento de utilizar as rugosidades locais da superfície. No processo fotogramétrico, excetuando-se outras fontes de erros e de planejamento de voo, as áreas reconstruídas (pontos) de maior incerteza são relacionadas às de cobertura vegetal, assim, foi possível considerá-las no M3C2-PM.

Para tanto, mapas de precisão foram calculados como em James et al. (2017b): projetos ASMS foram preparados para o programa Python *precision_estimates.py* (atualizado para a versão ASMS utilizada e mantidas as 4.000 iterações da abordagem estatística de Monte Carlo proposta pelos autores do M3C2-PM).

Figura 72 - Precisões em milímetros das coordenadas dos pontos das nuvens esparsas de (A) 2017 e (B) 2019, considerando 4.000 iterações em uma abordagem Monte Carlo (James et al., 2017b).

Tabela 29 – Resultados da análise das precisões das coordenadas dos pontos para 2017 e 2019.

	2017			2019		
	Precisão em imagem final (após rotina Python ²)					
Pontos homólogos (pix)	0,35			0,38		
Pontos de controle (pix)	0,1			0,11		
	Precisão média do georreferenciamento					
Rotação eixo fixo X, Y, Z (mgrau)	0,00	3,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Translação X, Y, Z (mm)	3,88	3,76	5,28	3,79	3,52	7,39
Escala (%)	0,004			0,002		
	Precisão média dos pontos (mm)					
Pontos georreferenciados X, Y, Z	19,67	17,93	43,75	17,37	17,35	44,82
Apenas os pontos ¹ X, Y, Z	18,92	17,1	42,9	16,34	16,45	42,95
	Razões de precisão relativa sem dimensões					
Precisão média em pixels (XY)	0,89			0,99		
Precisão média em pixels (Z)	1,4			1,7		

¹Relativa a precisão interna sem componente externa de georreferenciamento. ²Rotina escrita neste trabalho. Fonte: projeto *sfm_georef* v.3.1 com dados ASMS v.1.5.1 para cada aquisição.

Os resultados obtidos no ASMS, então, foram importados no *software sfm_georef* para derivação das estimativas médias de precisão e por ponto (Figura 72 e Tabela 29) e interpolação dos mapas de precisão (por padrão, célula de 1,0 m de lado). A nuvem resultante do algoritmo M3C2 (com o cálculo das distâncias anteriormente realizado) foi associada às precisões dos pontos pelos mapas interpolados e os limites de detecção (mudanças significativas, ou não) foram recalculados, resultando no M3C2-PM.

A precisão média do georreferenciamento das cenas obteve valor baixo de mudança de escala, rotação e translação e as estimativas indicaram que a precisão média de georreferenciamento dos pontos (em X, Y e Z) das cenas reconstruídas foram compatíveis com os valores obtidos nos pontos de apoio de campo, assim como, compatíveis entre aquisições e também com as suas próprias precisões internas. Esta análise foi realizada com base nas nuvens esparsas e, posteriormente, transferida para as nuvens densas e no cálculo M3C2-PM, no *sfm_georef*, utilizando os mapas interpolados de precisão.

O *sfm_georef > Monte Carlo Precision Analysis > M3C2-PM change detection* recalcula se houve, ou não, mudanças significativas com base nas estimativas das precisões dos pontos, modificando os limites de detecção locais (por ponto da nuvem esparsa transferido por meio de células do mapa interpolado para as nuvens densas), considerando o erro de registro calculado anteriormente.

Figura 73 – Vista 3D do resultado do cálculo variante M3C2-PM se houve, ou não, mudanças significativas (erro de registro de 5cm): não houve mudança significativa. Notar a mudança em relação à Figura 71, onde o escalar de mudança significativa considerou apenas a rugosidade local (M3C2).

O resultado, obtido com o M3C2-PM (Figura 73) utilizando os parâmetros definidos anteriormente (as normais, p. ex.), as distâncias M3C2 e o erro de registro calculados, foi de que não ocorreram mudanças estatisticamente significativas, inclusive nas superfícies de ruptura das cicatrizes C1 e C2, para o período considerado. Isto foi coerente com o observado em campo e com as informações prestadas pela Defesa Civil Distrital (sem movimentações no período apesar das chuvas intensas ocorrida, p. ex.). Este resultado, no entanto, não significa que mudanças abaixo do limite de detecção (mínimo de 5 cm referente ao erro de registro, neste caso) não possam ter ocorrido, especialmente considerando o solo das superfícies de cisalhamento dos deslizamentos exposto às intempéries.

7. DISCUSSÃO

O detalhamento foi realizado na apresentação dos resultados, porém, serão reapresentados e discutidos os resultados principais e significativos da pesquisa, com uma análise interpretativa e perspectivas de aplicação.

Uma das características na análise dos movimentos de massa é a presença de movimentos pretéritos como um dos parâmetros para comportamento futuro, ou, esperado. Assim, foi identificada uma área de alta suscetibilidade aos movimentos de massa considerando declividade, geomorfologia, geologia, aspectos geológico-geotécnicos, histórico de evolução, pluviometria e com indícios de movimentos presentes, localizada na vertente norte-nordeste da Serra do Morro Doce, a noroeste da cidade de São Paulo, SP.

A área tem difícil acesso, apesar de inserida em área urbana, pela alta declividade, vegetação e processos de instabilidade presentes na encosta, que dificultaram o caminhar e a instalação e aquisição dos pontos de apoio do terreno. Esta característica refletiu na geometria da rede de pontos de apoio obtida e na realização das campanhas de aquisição (p. ex., duas em 2019).

Atualmente, o emprego de pontos de apoio no terreno toma muito tempo em sua obtenção, assim, a alternativa é a utilização de georreferenciamento direto (com uso de sistemas de posicionamento precisos embarcados nas aeronaves não tripuladas), permitindo a minimização do número de pontos de apoio (para fins de conferência do georreferenciamento e eventuais correções de distorções geométricas), ou, sua eliminação, para locais onde não é possível o emprego dos pontos de apoio (p. ex., áreas de difícil acesso, ou perigosas).

A despeito da dificuldade de obtenção, os pontos GNSS adquiridos em alvos instalados da área e pós processados alcançaram localização com precisão centimétrica a milimétrica e foram observados em número suficiente nas fotografias aéreas para utilização apropriada. Após, os voos alcançaram o objetivo (aquisição das fotos da região suscetível) ao seguirem o planejamento realizado (acompanhando o perfil declivoso da encosta e mantendo o GSD aproximadamente constante).

Os trabalhos de campo resultaram em dois conjuntos de dados: o primeiro de 2017 (sete pontos de apoio e 155 fotografias aéreas) e o segundo de 2019 (oito pontos de apoio e 484 fotografias), comparáveis entre si, cobrindo as áreas instáveis identificadas em campo e na inspeção visual dos dados LiDAR-ALS.

O intervalo entre aquisições foi de 1 ano, 7 meses e 27 dias englobando dois períodos de chuvas de verão (de maior probabilidade de ocorrerem os movimentos de massa), com um acumulado total de 1.879,43mm. De acordo com os registros histórico e pluviométrico, neste período, pelo menos dez (10) dias registraram chuvas acumuladas acima de 30mm, com capacidade de deflagração de novos movimentos de massa, ou, de reativações nos deslizamentos identificados no Morro Doce. Porém, não se registrou nenhum movimento (de blocos, ou deslizamentos) identificável visualmente, ou, em relatos à Defesa Civil Distrital.

A conversão de formato de arquivos (RAW para JPEG) das imagens aéreas foi realizada com parâmetros padrão. Esta etapa pode abrir possibilidades de melhoria dos produtos gerados no processamento SfM-MVS, ao controlar o realce e as distorções geométricas das imagens, carecendo de verificação detalhada.

A investigação inicial dos dados para obtenção dos parâmetros iniciais e a padronização dos processamentos (via Python) buscaram a melhor qualidade possível dos produtos gerados (nuvens de pontos) para mitigar, ou, minimizar erros e distorções da reconstrução da cena e eventuais vieses provenientes de processamento manual que pudessem ser propagados até a etapa final de detecção de mudanças, ou interferissem nos resultados.

Os erros obtidos nos pontos de verificação (*check points*), após processamento inicial de ambas as aquisições, foram centimétricos e consistentes com os GSDs teóricos, geometrias das redes de pontos de apoio e suas precisões.

Após, as nuvens densas SfM-MVS foram geradas para os anos de 2017 e 2019 e suas filtragens (remoção de pontos de objetos acima do solo), realizadas em várias etapas para obtenção do melhor resultado possível, utilizaram o algoritmo CSF (*Cloth Simulation Filter*) em segmentos das nuvens, as distâncias C2M para uma superfície interpolada de referência do solo (obtida dos dados LiDAR-ALS classificados) e uma análise criteriosa com remoção manual de pontos. As nuvens filtradas permitiram estabelecer a comparação por uma área comum, que cobriu as principais feições de instabilidade (cicatrices C1 e C2).

Os dados LiDAR-ALS foram centrais no processo de filtragem das nuvens fotogramétricas, ressaltando a diferença entre as características dos dados utilizados no trabalho (p. ex., dados fotogramétricos, que imageiam a superfície, e dados LiDAR, que penetram na vegetação). Os dados fotogramétricos têm desvantagem em áreas vegetadas, onde o LiDAR aparece como excelente alternativa, no entanto, seu

emprego pode ser direcionado às feições de instabilidade de uma encosta (como apresentado neste trabalho), se elas forem visíveis por fotografias (como o solo exposto das cicatrizes) e à áreas de afloramentos e blocos rochosos, entre outras, desde que tenham baixa, ou nenhuma, vegetação provocando oclusão das feições de interesse da encosta.

Quando as nuvens de pontos são utilizadas em detecção de mudanças topográficas, a filtragem de objetos acima da superfície do solo (vegetação e edificações, p. ex.) é necessária, mesmo em casos de pouca, ou nenhuma, vegetação, e, assim, estudos, pesquisas e desenvolvimento de novos algoritmos de filtragem, ou classificação, de pontos (baseados em aprendizagem de máquina, p. ex.) são necessários para tornar o processo mais robusto, eficiente e confiável.

A aplicação do M3C2 para comparação entre as nuvens filtradas, com o erro de registro de 5cm (calculado em áreas consideradas estáveis durante o período de estudo e consistente com os valores dos pontos de verificação), orientada às feições de instabilização C1 e C2, resultou em pequenas diferenças (mudanças) positivas e negativas, consideradas significativas (acima do limite de detecção) e que poderiam ser interpretadas como acréscimos e decréscimos de material (p. ex., deslizamentos rasos, ou a evolução destes) ocorridos durante o período entre as aquisições fotogramétricas e não constatados visualmente.

O algoritmo M3C2, criado para LiDAR, considera em seu limite de detecção a informação da incerteza da posição dos pontos (p. ex., precisão dos pontos LiDAR, dependente da aquisição, sensor e método de georreferenciamento), a variação espacial das rugosidades das nuvens (dependente dos parâmetros de entrada M3C2 e da técnica de aquisição) e do erro de registro (métodos de registro).

Os parâmetros mais adequados para entendimento da precisão dos pontos fotogramétricos, no entanto, são (1) a reconstrução 3D, (2) os erros reportados na aquisição GNSS dos pontos de apoio e dos pontos de verificação após amarração das nuvens e (3) do erro de registro. As precisões dos pontos SfM-MVS foram estimadas externamente com base em uma abordagem Monte Carlo (4.000 iterações) no ajustamento de feixes de raio perspectivos e que considera e registra a variabilidade das coordenadas em X, Y e Z dos pontos das nuvens esparsas dentro dos projetos do Agisoft Metashape (James et al., 2017b). Os resultados, consistentes com o processamento, foram incorporados pela alteração do limite de detecção, para considerar as precisões dos pontos e erro de registro.

Assim, não houve mudança significativa detectada entre as aquisições, consistente com o observado em campo e informações disponíveis até nosso conhecimento, efetivando o procedimento realizado. Mudanças abaixo do limite de detecção podem ter ocorrido, porém, foram estatisticamente descartadas.

As nuvens de pontos de 2017 e 2019, ao serem submetidas à abordagem de Monte Carlo para avaliação das incertezas de cada aquisição (James et al., 2017b), tiveram precisões médias (por pontos) e relativas (em pixels) semelhantes. Os valores relativamente diferentes dos erros totais reportados nos pontos de verificação (menores) devem-se, provavelmente, à influência pontual dos pontos de controle na amarração das nuvens (p. ex., reflexo da geometria da rede de pontos de apoio em área de difícil acesso e de sua influência nos ajustamentos por feixes de raios, mesmo com a filtragem de pontos de maior erro), enquanto que a análise externa ao Agisoft Metashape, da variabilidade das coordenadas dos pontos das nuvens esparsas, estima as precisões das aquisições como um todo.

O monitoramento de movimentos de massa requer avaliações constantes de extensão, dos deslocamentos horizontal e vertical e, convencionalmente, é realizado por métodos baseados em superfície (que podem ser custosos e morosos), limitando a cobertura das avaliações (Al-Rawabdeh et al., 2016).

A metodologia de coleta de dados 3D em uma série temporal (utilizando fotogrametria aérea SfM-MVS por aeronave não tripulada e amarração por pontos de apoio do terreno), empregada com sucesso em outros trabalhos de monitoramento e caracterização da dinâmica de processos de encosta (Fernández et al., 2015), seguida de comparação de nuvens de pontos para detecção de mudanças, apresentou-se como uma alternativa de relativo baixo custo (equipamentos, *software*), de baixa complexidade (sem necessidade de especialização), flexível (no emprego das aeronaves e resolução temporal possível) e de alta resolução (espacial e dos dados 3D) para monitoramento e estudo das áreas suscetíveis aos movimentos de massa e feições de instabilidade.

A utilização da técnica em monitoramento pode permitir o estabelecimento das relações entre agentes (chuvas, p. ex.) e sinais que antecedem a deflagração de movimentos de massa (trincas e degraus de abatimento, p. ex.), ou, mesmo da própria ruptura principal (deslizamentos, p. ex.). No caso estudado, o tempo entre aquisições não foi suficiente para ocorrerem movimentos detectáveis (acima do limite de detecção da técnica empregada), mesmo com a ocorrência de chuvas intensas, o que

indica uma estabilidade aparente apesar das feições recentes e da alta suscetibilidade, indicando que um monitoramento contínuo da encosta permitiria o maior entendimento, registro e acompanhamento de eventuais reativações dos deslizamentos, ou, da geração de novas rupturas.

A metodologia utilizada pode contribuir para estudos de alcance de atingimento dos diferentes materiais da encosta que possam sofrer ruptura (p. ex., queda de blocos e deslizamentos) com a integração de modelos de terreno de alta resolução (que podem ser provenientes da própria fotogrametria SfM-MVS, de dados LiDAR, se disponíveis, ou, de outras fontes, p. ex.) e a detecção de mudanças topográficas na entrada de modelagens do alcance (atingimento) dos movimentos de massa.

As nuvens de pontos SfM-MVS permitiram a caracterização precisa das feições de instabilidade recentes na encosta (cicatrices de deslizamento C1 e C2), especialmente por terem solo exposto, com medidas de comprimento, largura e do abatimento. A nuvem LiDAR, por sua característica de permitir a obtenção dos pontos de solo abaixo da vegetação, permitiu a inferência de um corpo de tálus localizado a meia encosta (em meio a vegetação mais densa), por sua geometria em planta e perfil, combinado com dados geológico-geotécnicos existentes de subsuperfície (sondagens, p. ex.) e do observado em levantamento expedito geológico-geotécnico de superfície durante o caminhar (depósito de blocos métricos provenientes do topo da encosta e solo com feições de colúvio/tálus, p. ex.).

Os dados 3D, desde que processados com rigor, densidade correta e entendimento das particularidades de cada tecnologia de obtenção, podem ser utilizados na caracterização física em detalhes das encostas e suas diferentes feições (erosões, cicatrizes, estruturas, depósitos de encosta e afloramentos, p. ex.).

A aplicação prática, de detecção de mudanças neste trabalho (Morro Doce), restringiu-se a uma encosta natural, porém, a aplicação pode ser estendida para outros cenários, inclusive antrópicos. Em áreas urbanas (susceptíveis, ou de riscos geológicos) a utilização da fotogrametria pode ser promissora, por ter menos vegetação e formas de evitar a existente, quando aplicada no gerenciamento preventivo de riscos, com seu resultado representando um modelo da dinâmica dos processos nos diferentes cenários imageados, provendo suporte à tomada de decisões (p. ex., suporte à retirada de moradias de área de risco pela evolução desfavorável de taludes, ou, pelo gradual acúmulo de material lançado formando depósitos instáveis).

Para monitoramento de encostas, pode-se entender a metodologia empregada como uma ferramenta preventiva para caracterização geológica-geotécnica, direcionada às feições de instabilidade, formada a partir da integração de diferentes áreas do conhecimento (geologia, geomorfologia, sensoriamento remoto, geotecnologias, programação, entre outras).

8. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou uma comparação entre aquisições de épocas diferentes de dados 3D aerofotogramétricos SfM-MVS (nuvens de pontos densas registradas por pontos de controle), obtidos por aeronaves não tripuladas (drones, ou RPAs), para detecção de mudanças de uma encosta (Morro Doce, São Paulo, SP) altamente suscetível a processos geodinâmicos, como os movimentos de massa. A localidade apresenta histórico recente de mobilização de massa deflagrada por chuvas concentradas, além de apresentar depósitos geológico-geotécnicos (colúvio e tálus) que indicam que os processos estão instalados a bastante tempo.

Encostas suscetíveis como estas, geralmente, são instáveis, potencialmente perigosas e de difícil acesso. A técnica empregada pode ser uma alternativa rápida e de baixo custo em relação a técnicas convencionais de instrumentação geotécnica de encostas para identificação e monitoramento da evolução da estabilidade que, inclusive, podem ser inviabilizadas pelas dificuldades inerentes a uma área instável.

O emprego de RPAs é rápido, no planejamento e aquisição de fotografias aéreas, permitindo resolução temporal adequada a diferentes cenários de encostas e processos correlatos. A cobertura da área depende da altura de voo sobre o solo, planejamento e da autonomia do equipamento (número de baterias) e, neste trabalho, suficiente para os deslizamentos imageados.

O RPA atua em uma escala de trabalho intermediária, entre o trabalho de campo convencional e aquele proporcionado por aeronave, ou satélite, para obtenção de imagens. Permite também a obtenção de fotografias oblíquas de alta resolução que complementam a análise, se for o caso. Em termos de sensores, podem contar com câmeras multiespectrais, infravermelho, LiDAR e outros, abrindo novas possibilidades de aplicação em encostas e movimentos de massa.

É necessário que seja assegurada a existência de alvos na área de interesse, naturais, artificiais, fixos ou não, para minimizar erros de registro entre nuvens. Os pontos de apoio em campo consomem tempo, o que pode inviabilizar sua utilização, dependendo mais uma vez das condições ambientais e da área de interesse. A alternativa é a utilização de GNSS de alta precisão embarcado na aeronave (com solução RTK, ou PPK) para georreferenciamento direto, evitando o trabalho de campo extensivo e a amarração das imagens por inúmeros pontos de apoio em escritório. Neste caso, os pontos serviriam para checar a precisão da solução de posicionamento

embarcada em relação ao mundo real e para mitigar as eventuais distorções geométricas do processamento SfM-MVS.

O processamento SfM-MVS gera nuvens de pontos de alta qualidade e alta precisão interna e externa (com pontos de controle adequados). A utilização das nuvens de pontos, em detrimento de MDS e MDT, suprime a utilização de interpoladores e da filtragem em modelo dos objetos acima da superfície do terreno. A filtragem é realizada diretamente nas nuvens de pontos por diferentes abordagens e algoritmos, cada qual com vantagens e desvantagens para diferentes cenários.

A vegetação dificulta o emprego da fotogrametria SfM-MVS, especialmente se a análise temporal (comparação entre nuvens) for realizada nas épocas de rápido crescimento vegetacional e em locais com vegetação densa. A recuperação de pontos do solo, para aplicação das técnicas de comparação entre nuvens para fins de detecção de mudança topográfica, depende de algoritmos especializados, ou da utilização de dados de referência (como o LiDAR-ALS utilizado). Neste trabalho, a análise restringiu-se apenas às feições de instabilidade presentes na encosta, com solo exposto, para minimizar erros e interpretações errôneas.

Foi aplicada técnica de detecção de mudanças, baseada em nuvens de pontos registradas por pontos de apoio do terreno para cada aquisição, em feições de instabilidade identificadas na área de estudo. Com o fluxo metodológico empregado, considerando o intervalo entre as aquisições, os resultados M3C2 indicaram pequenas mudanças topográficas detectáveis nas instabilizações. As informações de campo e da Defesa Civil, no entanto, não indicaram evoluções observáveis das feições de instabilização (erosão, deslizamento, plano de ruptura, cicatrizes, degraus de abatimento), a despeito de terem ocorridos dias de chuvas concentradas com acumulados acima dos limiares que historicamente deflagraram deslizamentos. A utilização de estimativas de precisão M3C2-PM, mais coerentes com o tipo de dado utilizado, demonstraram que não houve mudanças significativas.

Aparte das desvantagens inerentes, o procedimento metodológico utilizado mostrou-se viável para identificação, mapeamento e monitoramento de movimentos de massa em encostas suscetíveis. O resultado obtido representa um modelo histórico de mudança mais detalhado do que as informações disponíveis anteriormente (baseadas em relatos, ou observações a distância), que pode ser utilizado como base inicial para monitoramento contínuo permitindo estabelecer relações entre movimentação e agentes de deflagração e modificação da paisagem natural.

Referências

- Ab'Saber, A.N., 1948, Notas sobre a geomorfologia do Jaraguá e vizinhanças: Boletim FFCL-USP, São Paulo, v.12, no.10, p. 15-25.
- Ab'Saber, A.N., 1951, Geomorfologia da região do Jaraguá, São Paulo, *in* Anais, Associação dos Geógrafos, São Paulo, v.2, p. 29-53.
- Aber, J.S., Marzloff, I., e Ries, J.B., 2010, Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications: Amsterdam, Elsevier, 268 p.
- Agisoft Community Forum, 2019, Agisoft Community Forum, Python Scripts, <http://agisoft.com/forum> (acessado Junho 2019).
- Agisoft, 2019, Agisoft Metashape Professional, v. 1.5.1: pacote de *software* para realizar processamento *structure-from-motion*, <http://www.agisoft.com> (acessado Setembro 2019).
- Al-Rawabdeh, A., Al-Gurrani, H., Al-Durgham, K., Detchev, I., He, F., El-Sheimy, N., e Habib, A., 2016, A robust registration algorithm for point clouds from UAV images for change detection, *in* Proceedings, ISPRS International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLI-B1, p. 765-772, doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-765-2016.
- Asghar, U., 2017, Landslide mapping from analysis of UAV-SfM point clouds [Dissertação de Mestrado]: Okanagan, University of British Columbia, College of Graduate Studies, 146 p., doi:10.14288/1.0357952.
- Augusto Filho, O., 1992, Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica, *in* Anais, 1 Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, RJ, ABMS, ABGE, p. 721-733.
- Augusto Filho, O., 1995, Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle, *in* Bitar, O.Y., coord., Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente: São Paulo, SP, ABGE-IPT, p. 77-100.
- Augusto Filho, O., Virgili, J.A., e Dilácio, M.V., 2018, Estabilização de taludes, *in* Oliveira, A.M.S., Monticeli, J.J., eds., Geologia de Engenharia e Ambiental: São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, p. 399-420.
- Axelsson, P., 2000, DEM generation from LASER scanner data using adaptive TIN models, *in* Proceedings, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 33, part B4, Amsterdam, p. 110-117.
- Banco Mundial, 2012a, Avaliação de Perdas e Danos: Inundações e Deslizamentos na Região Serrana Rio de Janeiro: Janeiro 2011, <http://documents.worldbank.org/curated/en/260891468222895493/pdf/NonAsciiFileName0.pdf> (acessado Junho 2017).
- Banco Mundial, 2012b, Understanding Risk: Entendendo o Risco Brasil, <http://documents.worldbank.org/curated/en/666311484206155860/pdf/WP-URBR-Web-PUBLIC-PORTUGUESE-ABSTRACT-SENT.pdf> (acessado Junho 2017).
- Barnhart, T.B., e Crosby, B.T., 2013, Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik river, Alaska: Remote Sensing, v. 5, no. 6, p. 2813-2837, doi:10.3390/rs5062813.
- Batut, A., 1890, La photographie aérienne par cerf-volant: Paris, Gauthier-villars et fils, imprimeurs-librairies, 80 p., <http://www.numerisationterrain.fr/pdf/PhotographieAerienneCerfVolant.pdf> (acessado Fevereiro 2018).

- Baumann, P.R., 2014, History of remote sensing, aerial photography: GeoSAT 2: New York, State University New York, College Oneonta, 15 p., <http://www.oneonta.edu/faculty/baumanpr/geosat2/RS%20History%20I/RS-History-Part-1.pdf> (acessado Fevereiro 2018).
- Bitar, O.Y., Iyomasa, W.S., e Cabral Jr., M., 2000, Geotecnologia: tendências e desafios: São Paulo Perspectiva, v. 14, no. 3, p. 78-90, doi:10.1590/S0102-883920000000 300013.
- Boston Public Library BPL, 1860, Boston, as the Eagle and the Wild Goose See It. James Wallace Back, 13 out. 1860. 1 fotografia, preto e branco, http://www.flickr.com/photos/boston_public_library/5060829306/ (acessado Fevereiro 2018).
- Brabb, E.E., 1991, The world landslide problem: Episodes, Journal of International Geoscience, v. 14, no. 1, p.52-61, <http://52.172.159.94/index.php/epi/article/view/63222/49343> (acessado Setembro 2019).
- Brasil, 2017, Agência Nacional Aviação Civil, Regulamento Brasileiro Aviação Civil Especial: requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil, RBAC-E, 94, Brasília, 26 p.
- Brasil, 2018, Ministério Defesa, Comando da Aeronáutica, Departamento Controle do Espaço Aéreo, Aeronaves não tripuladas e o acesso espaço aéreo brasileiro, ICA-100-40, 56 p.
- Cambridge In Color, 2018, Digital Camera Diffraction, <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/diffraction-photography-2.htm> (acessado Fevereiro 2018).
- Campbel, R.H., Varnes, D.J., Fleming, R.W., Hampton, M.A., Prior, D.B., Sangrey, D.A., Nichols, D.R., e Brabb, E.E., 1985, Landslide classification for identification of mud flows and other landslides, *in* Feasibility of a Nationwide program for the identification and delineation of hazards from mud flows and other landslides: U.S. Geological Survey, FEMA, Open-file report 85-276A, 32 p.
- Campbell, J.B., 2008, Origins of aerial photographic interpretation, U.S. Army, 1916 to 1918: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 74, no. 1, p. 77-93, <https://www.westpoint.edu> (acessado Fevereiro 2018).
- Car, M., Kacunic, e D.J., Kovacevic, M.-S., 2016, Application of unmanned aerial vehicle for landslide mapping, *in* Proceedings, International Symposium of Engineering Geodesy SIG 2016, Varazdin, Croatia, p. 549-560, http://www.geof.unizg.hr/pluginfile.php/7437/mod_book/chapter/173/TS6_5.pdf (acessado Setembro 2019).
- Carneiro da Silva, D., 2015, Evolução da fotogrametria no Brasil: Revista Brasileira de Geomática, v.3, n.2, p. 81-96.
- Carneiro, C.D.R., Santos, L.F., e Silva, J.R.B., 2011, Cavas históricas de ouro do Jaraguá: o que resta para se preservar?: Revista Brasileira de Geociências, v. 41, no. 1, p. 108-119.
- Carneiro, C.D.R., 1983, Análise estrutural do Grupo São Roque na faixa entre o Pico do Jaraguá e a Serra dos Cristais, SP [Tese de Doutorado] São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 186 p.
- Carneiro, C.D.R., 2002, Cavas de Ouro Históricas do Jaraguá, SP: Os primórdios da mineração no Brasil, *in* Schobbenhaus, C. et al., eds., Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil: Brasília, Departamento Nacional Produção Mineral / Serviço Geológico do Brasil, Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, p. 511-516.
- Carneiro, C.D.R., Hasui, Y., Nagata, N., e Lima, M.O., 1985, Padrões de superposição de estruturas do Grupo São Roque na faixa Jaraguá-Cristais (SP): Revista Brasileira de Geociências, v. 15, no. 2, p. 116-130.

- Carrivick, J.L., Smith, M.W., e Quincey, D.J., 2016, Structure From Motion in the Geosciences: West Sussex, United Kingdom, Wiley Blackwell, 206 p.
- Carvalho, C.S., e Galvão, T., orgs., 2006, Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais: Brasília, Ministério das Cidades, 113p.
- Carvalho, C.S., Macedo, E.S., e Ogura, A.T., 2007, Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios: Brasília, Ministérios das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 176p.
- Carvalho, P.A.S., Freitas, C.G.L., Wolle, C.M., Gama Jr., G.F.C., Barros, J.M.C., Cunha, M.A., Galves, M.L., Pinto, C.S., Orlandi, C., Camargo, J.C.C., Okawa, M., e Prieto, V., 1991, Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções dos problemas: São Paulo, Departamento de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 206 p.
- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos CPTEC, 2019, El Niño e La Niña, Instituto Nacional Pesquisas Espaciais - INPE, <http://enos.cptec.inpe.br> (acessado Setembro 2019).
- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres CEMADEN, 2019, Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais, Série histórica do Pluviômetro Jardim Anhanguera (355030885A), Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 24 planilhas, <http://www.cemaden.gov.br/> (acessado Setembro 2019).
- Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres CEPED-UFSC, 2016, Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014: Florianópolis, Universidade Federal Santa Catarina, 232 p.
- Cerri, L.E.S., 1992, Identificação, análise e cartografia de riscos geológicos associados a escorregamentos, *in* Anais, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1, Rio de Janeiro, RJ, ABMS, ABGE, p. 605-617.
- CloudCompare, 2019, CloudCompare v. 2.11 Alpha Anóia: pacote *open-source* para nuvens de pontos, <http://www.danielgm.net/cc/> (acessado Setembro 2019).
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais SGB-CPRM, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT-SP, 2014, Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações, São Paulo, SP, 1 mapa, color, escala 1:25.000, <http://www.cprm.gov.br> (acessado Julho 2018).
- Coutinho, J.M.V., 1972, Petrologia do Pré-Cambriano em São Paulo e arredores: Boletim IG - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, v. 3, p. 5-99.
- Coutinho, J.M.V., 1980, Carta geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo, São Paulo, SP, Emplasa, 2 folhas, escala 1:100.000.
- Cox, S., 2018, What Is Lens Diffraction?, *in* Photography Life, <https://photographylife.com/what-is-diffraction-in-photography> (acessado Fevereiro 2018).
- Crósta, A.P., 1992, Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto: Campinas, SP, Universidade de Campinas, Instituto de Geociências, 170 p.
- Crozier, M.J., 2010, Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review: Geomorphology, v. 124, p. 260-267, doi:10.1016/j.geomorph.2010.04.009.
- Cruden, D.M., 2003, The first classification of landslides?: Environmental and Engineering Geoscience, v. 9, no. 3, p. 197-200, doi:10.2113/9.3.197.
- Cruden, D.M., 1991, A simple definition of a landslide: International Association of Engineering Geology Bulletin, v. 43, no. 1, Paris, p. 27-29, doi:10.1007/BF025 90167.

- Cruden, D.M., e Varnes, D.J., 1996, Landslide types and processes *in* Schuster, R.L., Turner, A.K., Landslides: investigation and mitigation, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy of Sciences, p. 36-75, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf> (acessado Junho 2019).
- Cunha, M.A., Farah, F., Cerri, L.E., Gomes, L.A., Galvês, M.L., Bitar, O.Y., Augusto Filho, O., e Silve, W.S., 1991, Ocupação de Encostas: São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Publicação IPT no. 1831, 238p.
- Dantas, A.S.L., 1990, Geologia da Faixa São Roque e intrusivas associadas na região entre São Paulo e Mairiporã, norte de São Paulo – SP [Dissertação de Mestrado] São Paulo, USP, Inst. Geociências, 247 p, doi: 10.11606/D.44.1991.tde-04022014-150235.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo DAEE-SP, 2019, Banco de dados hidrológico, Pluviométrico, <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/> (acessado Setembro 2019).
- Departamento de Desenvolvimento Rodoviário S.A. DERSA, 1995, Projeto geológico-geotécnico do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, Trecho Oeste, 11 PDFs, <http://www.dersa.sp.gov.br/>.
- Dietrich, J., 2018, `offNadir_resolution_v1-0.py`, *script* Python, https://github.com/geojames/py_offNadir_Res (acessado Maio 2018).
- DJI, 2019, Líder em drones, <http://www.dji.com/> (Acessado Abril 2019).
- Emplasa, Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A., 2010, 1 ortofoto, color, SF-23-Y-C-III-3-SE, formato TIFF.
- Evans, J.S., e Hudak, A.T., 2007, A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LIDAR in forested environments: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 45, no. 4, p. 1029-1038, doi:10.1109/TGRS.2006.890412.
- Fahlstrom, P.G., e Gleason, T.J., 2012, Introduction to UAV Systems: Sussex, United Kingdom, John Wiley and Sons, 306 p., isbn: 978-1-119-97866-4.
- Farnik, K., 2010, Lens Crop Factor, [Licença GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LensCrop_Factor.png (acessado Fevereiro 2018).
- Fernandes, N.F., 2013, Modelagem em movimentos de massa, *in* Anais, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14, Rio de Janeiro, ABGE.
- Fernandes, N.F., e Amaral, C.P., 2000, Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica, *in* Guerra, A.J.T., Cunha, S.B., org., Geomorfologia e meio ambiente: Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p.123-194.
- Fernández, T., Pérez, J.L., Cardenal, F.J., López, A., Gómez, J.M., Colomo, C., Delgado, J., e Sánchez, M., 2015, Use of a UAV and photogrammetric techniques to study the evolution of a landslide in Jaén (southern Spain), *in* Proceedings, ISPRS International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XL-3/W3, p. 241-248, doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-241-2015.
- Fernández, T., Pérez, J.L., Cardenal, J., Gómez, J.M., Colomo, C., e Delgado, J., 2016, Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques: Remote Sensing, 2016, v. 8, no. 10, 837, p. 1-29, doi:10.3390/rs8100837.
- Fernández, T., Pérez, J.L., López, A., Gómez, J.M., Cardenal, J., e Delgado, J., 2014, Monitorización de laderas inestables mediante técnicas fotogramétricas a partir de vuelos

- UAV e históricos, *in* Proceedings, 16 Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Alicante, Espanha, p. 202-213.
- Fornasari Filho, N., e Faria, M.S.C., 2018, Relevo e dinâmica superficial, *in* Oliveira, A.M.S. e Monticelli, J.J., eds., *Geologia de Engenharia e Ambiental*: São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental ABGE, p. 205-228.
- Freire, E.S.M., 1965, Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática: *Revista Construção*, Rio de Janeiro, v. 8, no. 95, p. 10-18.
- Geospatial Information Authority of Japan, Geospatial Information Department Disaster Countermeasures Group Responses, GSI-DCG, 2016, Kumamoto Earthquake, <http://www.gsi.go.jp> (acessado Junho 2017).
- Gerscovich, D.M.S., 2009, Apostila Estabilidade de Taludes, Universidade Estadual do Rio de Janeiro - UERJ, Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações, 160p., <http://www.eng.uerj.br/~denise/> (acessado Julho 2018).
- Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., e Dosso, P., 2013, UAV photogrammetry: block triangulation comparisons, *in* Proceedings, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, v.XL-1/W2, p. 157-162, doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-157-2013.
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., e Thibault, G., 2005, Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner, *in* Proceedings, ISPRS International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, part 3, p.30-35, <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/3-W19/papers/030.pdf>.
- Google Earth Pro v.7.3.2, 2019, Morro Doce, São Paulo, SP, 316531m E, 7405022m N, elevação 1.000m, visualização: 23/06/2019, datas das imagens: 15/10/02, 10/02/03, 14/12/08, 04/03/09, 20/07/11, 09/05/12, 02/07/12, 30/12/12, 07/09/13, 27/03/14, 22/09/14, 05/09/15, 12/08/16, 26/08/16, 07/11/16, 13/11/17, 12/04/18, 11/12/18, 18/04/19, <http://www.earth.google.com/> (acessado Junho 2019).
- Gramani, M.F., 2015, A corrida de detritos (*debris-flow*) no Córrego Guarda-Mão, município de Itaoca, Vale do Ribeira, SP, *in* Anais, 15 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves.
- Grimm, K.A., 2007, The origin of the term photogrammetry, *in* Fritsch, D., eds., *Photogrammetric week 07*, Wichmann Verlag, Heidelberg, p.53-60.
- Guerra, A.J.T., Fullen, M.A., Jorge, M.C.O., Bezerra, J.F.R., e Shokr, M.S., 2017, Slope processes, mass movement and soil erosion: a review: *Pedosphere*, v. 27, no. 1, p.27-41, doi:10.1016/S1002-0160(17)60294-7.
- Guidicini, G., e Nieble, C.M., 1984, Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação: São Paulo, Blucher, 170 p.
- Gurgueira, M.D., 2013, Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo [Dissertação de Mestrado] São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 80 p, doi:10.11606/D.44.2013.tde-14112013-104040.
- Hasui, Y., Sadowski, G.R., e Carneiro, C.D.R., 1976, Considerações sobre a estratigrafia do Pré-Cambriano na região de São Paulo: *Boletim Inst. Geociências, USP*, v. 7, p. 107-112.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto, M.C., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., e Janasi, V.A., 2004, Província Mantiqueira, *in* Mantesso-Neto et al., orgs., *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*: São Paulo, Beca, p. 203-235.

- Henrique-Pinto, R., 2012, Proveniência e ambiente de sedimentação do Grupo São Roque com base na química de rocha total e datação U-Pb de zircões detríticos [Tese de Doutorado] São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 370 p., doi:10.11606/T.44.2012.tde-31072013-095101.
- Henrique-Pinto, R., e Janasi, V.A., 2007, Proveniência dos metaconglomerados do Grupo São Roque (SP): contribuições a partir da geoquímica dos seixos graníticos, *in* Anais, 11 Congresso Brasileiro Geoquímica, Atibaia, SBGQ, 4 p., <http://www.sbgq.org.br/phocadownload/XI/211.pdf> (acessado Julho 2018).
- Henrique-Pinto, R., e Janasi, V.A., 2010, Metaconglomerados e rochas associadas do Grupo São Roque a norte da cidade de São Paulo, Brasil: Revista Brasileira de Geociências, v. 40, no. 3, p. 409-425.
- Henrique-Pinto, R., Janasi, V.A., Carvalho, B.B., Calado, B.O., e Grohmann, C.H., 2014, Integrated Geological Map of the São Roque Domain, North of São Paulo City, Brazil: Maps, v. 10, no. 3, p. 434-439. doi. 10.1080/17445647.2014.883338
- Henrique-Pinto, R., Janasi, V.A., Tassinari, C.C.G., Carvalho, B.B., Cioffi, C.R., e Stríkis, N.M., 2015b, Provenance and sedimentary environments of the Proterozoic São Roque Group, SE-Brazil: contributions from petrography, geochemistry and Sm-Nd isotopic systematics of metasedimentary rocks: Journal South American Earth Sciences, v. 63, p. 191-207, doi:10.1016/j.jsames.2015.07.015.
- Henrique-Pinto, R., Janasi, V.A., Vasconcellos, A.C.B.C., Sawyer, E.W., Barnes, S.J., Basei, M.A.S., e Tassinari, C.C.G., 2015a, Zircon provenance in meta-sandstones of the São Roque Domain: implications for the Proterozoic evolution of the Ribeira Belt, SE Brazil: Precambrian Research, v. 256, p. 271-288, doi:10.1016/j.precamres.2014.11.014.
- Highland, L.M., e Brobowsky, P., 2008, The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 147 p.
- Hungr, O., Leroueil, S., e Picarelli, L., 2014, The Varnes classification of landslide types, an update: Landslides v. 11, p. 167-194, doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
- Hutchinson, D.J., Lato, M., e Gauthier, D., 2015, Applications of remote sensing techniques to managing rock slope instability risk, *in* Proceedings, GEOQuébec 2015, Québec city.
- Hutchinson, J.N., 1968, Mass movement, *in* Fairbridge, R.W., eds., The Encyclopedia of Geomorphology, Reinhold Book Corporation: New York, p. 688–695.
- Hutchinson, J.N., 1988, General Report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, *in* Bonnard, C., eds., Proceedings, 5th International Symposium on Landslides, Rotterdam: Balkema, v. 1, p. 3-36.
- Imperial War Museums, IWM, 2018a, Aerial Photography, First World War: IWM HU 91040, 1 fotografia, preto e branco, <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/205088087> (acessado Fevereiro 2018).
- Imperial War Museums, IWM, 2018b, Aerial Photography in Western Front During the First World War: IWM Q 27633, 1 fotografia, preto e branco, <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/205022501> (acessado Fevereiro 2018).
- Infanti Júnior, N., e Fornasari Filho, N., 1998, Processos de dinâmica superficial, *in* Oliveira, A.M.S., Brito, S.N.A., eds., Geologia de Engenharia, São Paulo, Associação Brasileira Geologia de Engenharia, p.131-152.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, 2019, Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RMBC), Geociências, Posicionamento geodésico, <http://ibge.gov.br> (acessado Setembro 2019).

- Isenburg, M., 2019, Lastools v. 190507: *software* para processamento de nuvens de pontos lidar, <http://rapidlasso.com/lastools/> (acessado Setembro 2019).
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., e Pedrazzini, A., 2012, The use of LIDAR in landslide investigations: a review: *Natural Hazards*, v. 61, no. 1, p. 5-28, doi:10.1007/s11069-010-9634-2.
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S. e Niethammer, U., 2017a, Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion photogrammetry: Ground control quality, quantity and bundle adjustment, *Geomorphology*, 280, 51–66, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.021.
- James, M. R., Robson, S., e Smith, M. W., 2017b, 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys, *Earth Surf. Proc. Landforms*, accepted, February, doi: 10.1002/esp.4125.
- James, M.R., 2017c, SfM-MVS PhotoScan image processing exercise, in *International Association of Volcanology Chemistry of the Earth's Interior 2017, Drone Workshop*, Lancaster University, 25 p.
- Jaud, M., Passot, S., Allemand, P., Dantec, N.L., Grandjean, P., Delacourt, C., 2019, Suggestions to limit geometric distortions in the reconstruction of linear coastal landforms by SfM photogrammetry with PhotoScan and MicMac for UAV surveys with restricted GCP pattern, *Drones*, v. 3, no. 2, 17 p., doi:10.3390/drones3010002.
- Jensen, J.L.R., e Mathews, A.J., 2016, Assessment of image-based point cloud products to generate bare Earth surface and estimate canopy heights in a woodland ecosystem: *Remote Sensing*, v. 8, no. 1, 50, 13 p., doi:10.3390/rs8010050.
- Jensen, J.R., 2009, Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres: São José dos Campos, SP, Parêntese, 604 p.
- Juliani, C., e Beljavskis, P., 1995, Revisão da litoestratigrafia da Faixa São Roque/Serra do Itaberaba (SP): *Revista Instituto Geológico*, São Paulo, v. 16, no. 1-2, p. 33-58, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8837> (acessado Julho 2018).
- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., Pérez-Aguillar, A., Monteiro, L.V.S., Meira, V.T., e Bustamante-Londoño, A., 2014, O Precambriano a norte da cidade de São Paulo: litoestratigrafia e evolução geológica, *in* *Anais*, 47 Congresso Brasileiro de Geologia, p. 1709.
- Juliani, C., Martin, M.A.B., McReath, I., Pérez-Aguillar, A., Clarimundo, S.J., Chiarini, A.P., e Fernandes, F., 1998, A evolução dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque a nordeste e noroeste da cidade de São Paulo (SP), *in* *Anais*, 40 Congresso Brasileiro Geologia, Belo Horizonte: SBG, p. 12.
- Kazhdan, M, Hoppe, H., 2013, Screened Poisson Surface Reconstruction: *Transactions on Graphics*, v. 32, no. 3, 13p.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., e Hoppe, H., 2006, Poisson Surface Reconstruction, *in* *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 10 p., <http://hhoppe.com/poissonrecon.pdf>.
- Klette, R., e Reulke, R., 2005, Modelling 3D scenes: paradigm shifts in photogrammetry, remote sensing and computer vision: *Communication and Information Technology Research Technical Report 155*, University Auckland, 8 p., <http://researchspace.auckland.ac.nz/bitstream/handle/2292/2810/CITR-TR-155.pdf> (acessado Fevereiro 2018).
- Kluger, A., 2008, Qual a escala de um voo digital?, *Esteio*, 4 p., <http://esteio.com.br/downloads/2008/EscalaDigital.pdf> (acessado Setembro 2019).

- Konecny, G., 1996, Paradigm changes in ISPRS from the first to the eighteenth congress in Vienna, *in* Annals, ISPRS congress, 18, v.1. n.1, Vienna, p.10-15, http://www.isprs.org/publications/highlights/highlights0101/paradigm_changes.pdf (acessado Fevereiro 2018).
- Konecny, G., 2014, Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems: Boca Raton, CRC Press, 436 p.
- Kraus, K., 2000, Photogrammetry: geometry from images and laser scans: Berlin, New York, DeGruyter, 459 p.
- Kraus, K., e Pfeifer, N., 1998, Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data: ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing, 53, p. 193-203.
- Lague, D., Brodu, N., e Leroux, J., 2013, Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z): ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 82, p. 10-26.
- Lato, M.J., Gauthier, D., e Hutchinson, D.J., 2015a, Selecting the optimal 3D remote sensing technology for the mapping, monitoring and management of steep rock slopes along transportation corridors, *in* Transportation Research Board 94th Annual Meeting (no.15-3055), <http://docs.trb.org/prp/15-3055.pdf> (acessado Abril 2018).
- Lato, M.J., Hutchinson, J., Gauthier, D., Edwards, T., e Ondercin, M., 2015b, Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain, *in* Canadian Geotechnical Journal, v. 52, p. 129-140, doi:10.1139/cgj-2014-0051.
- Lillesand, T., e Kiefer, R.W., Chipman, J., 2015, Concepts and foundations of Remote Sensing, Remote Sensing and Image Interpretation: New York, USA, Wiley, 736 p.
- Linder, W., 2009, Digital photogrammetry: a practical course: Berlin, Springer, 220 p., doi:10.1007/978-3-540-92725-9.
- Lowe, D.G., 2004, Distinctive image features from scale-invariant keypoints: International Journal of Computer Vision, 28 p., <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf> (acessado Março 2018), doi:10.1023/B:VISI.00000.
- Lucieer, A., Jong, S.M., e Turner, D., 2014, Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography: Journal of Progress in Physical Geography, v.38, issue 1, p.97-116, doi:10.1177/0309133313515293.
- Martin, M.A.B., 2000, Geologia, petrografia e metamorfismo dos grupos Serra do Itaberaba e São Roque a noroeste da cidade de São Paulo (SP) [Dissertação de Mestrado] São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 286 p., doi:10.11606/D.44.2000.tde-05102015-140256.
- Mendes, R., 2014, S.A.R.A. Brasil: restituindo o mapa topográfico do município de São Paulo. Breve história da aerofotogrametria nas cidades do Rio e São Paulo na década de 1920: Arquivo Histórico de São Paulo, ano 10, no. 37, <http://arquivohistorico.sp.gov.br/> (acessado Fevereiro 2018).
- Meneses, P.R., e Almeida, T., 2012, Introdução ao Processamento Digital de Imagens: Brasília, Universidade de Brasília, CNPq, 276 p.
- Meng, X., Currit, N., e Zhao, K., 2010, Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: a review of critical issues: Remote Sensing, v. 2, no. 3, p. 833-860, doi:10.3390/rs2030833.
- Meng, X., Shang, N., Zhang, X., Li, C., Zhao, K., Qiu, X., e Weeks, E., 2017, Photogrammetric UAV mapping of terrain under dense coastal vegetation: an object-oriented classification

- ensemble algorithm for classification and terrain correction: *Remote Sensing*, v. 9, no. 11, 1187, 23 p., doi:10.3390/rs9111187.
- Micheletti, N., Chandler, J.H., e Lane, S.N., 2015, Structure from motion (SfM) photogrammetry: Geomorphological techniques, ch.2, sec.2.2, British Society Geomorphology, p. 1-12, http://www.close-range.com/docs/Structure_From_Motion_photogrammetry-Micheletti-Lane-Chandler.pdf (acessado Setembro 2019).
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., e Riva, J., 2015, A comparison of open-source LiDAR filtering algorithms in a Mediterranean forest environment: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 8, no. 8, p. 4072-4085, doi:10.1109/JSTARS.2015.2436974.
- Neves da Silva, F.A., org., 2011, Cavas de ouro históricas do Jaraguá. São Paulo: Prefeitura de São Paulo, Relatório Técnico Grupo Trabalho da Prefeitura São Paulo GT-Ouro, 73 p.
- Nie, S., Wang, C., Dong, P., Xi, X., Luo, S., e Qin, H., 2017, A revised progressive TIN densification for filtering airborne LIDAR data: *Measurement*, v. 104, p. 70-77, doi:10.1016/j.measurement.2017.03.007.
- Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Traveletti, J., e Joswig, M., 2012, UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results: *Engineering Geology*, v. 128, p. 2-11, doi:10.1016/j.enggeo.2011.03.012.
- Niethammer, U., Rothmund, S., e Joswig, M., 2009, UAV-based remote sensing of the slow-moving landslide Super-Sauze, *in* Malet, J.P., Remaitre, A., Boogard, T., eds., *Proceedings, International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling*, Strasbourg, CERG, p. 69-74.
- Niethammer, U., Rothmund, S., James, M.R., Traveletti, J., e Joswig, M., 2010, UAV-based remote sensing of landslides, *in* *Proceedings, ISPRS International Archives Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*, v. 38, part 5, p. 498-501.
- Olague, G., 2016, Brief History of Photography and Photogrammetry, *in* Olague, G., *Evolutionary computer vision: the first footprints*, Natural Computing series: Berlin, Springer, p. 18-21, doi:10.1007/978-3-662-43693-6.
- Peterson, E.B., Klein, M., e Stewart, R.L., 2015, Whitepaper on Structure from Motion (SfM) Photogrammetry: Constructing Three Dimensional Models from Photography: U.S. Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior, Final report ST-2015-3835-1, Weaverville, USA, 46 p., https://www.usbr.gov/research/projects/download_product.cfm?id=1540 (acessado Setembro 2019).
- Pix4D Support, 2019, Tools: vertical pixel displacement calculator, <http://support.pix4d.com> (acessado Dezembro 2019).
- Polat, N., e Uysal, M., 2015, Investigating performance of airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation: *Measurement*, 63, p. 61-68, doi:10.1016/j.measurement.2014.12.017.
- Polat, N., e Uysal, M., 2017, DTM generation with UAV based photogrammetric point cloud, *in* *Proceedings, ISPRS International Archives Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sci.*, v. XLII-4/W6, p. 77-79, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-77-2017.
- Prefeitura de São Paulo, PMSP, 2003a, Relatório Técnico Monitoramento de Áreas de Risco: Itaberaba I e II. Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera, São Paulo, SP, 8p.
- Prefeitura de São Paulo, PMSP, 2003b, Relatório Técnico Monitoramento de Áreas de Risco: Jardim Jaraguá. Defesa Civil Distrital Perus-Anhanguera, São Paulo, SP, 5p.

- Prefeitura de São Paulo, PMSP, 2012, Parecer Técnico Geológico SP-PR/CPO #04/2012: monitoramento do “Morro de Jesus”, Morro Doce, Distrito Anhanguera, Subprefeitura Perus, Coordenadoria de Projetos e Obras, São Paulo (SP), 10p.
- Prefeitura de São Paulo, PMSP, 2019a, Fotos aéreas e ortofotos, Secretaria de Desenvolvimento Urbano, Geosampa: Mapa Digital da Cidade de São Paulo, <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br> (acessado Setembro 2019).
- Prefeitura de São Paulo, PMSP, 2019b, Série Histórica do Pluviômetro de Perus: Secretaria Municipal de Coordenação das Subprefeituras, Subprefeitura Perus, Coordenadoria Distrital de Defesa Civil, Centro de Gerenciamento de Emergência.
- Radulescu, M., e Vladareanu, V., 2017, Aerial Photography and the use of photo cameras attached to drones, *Aerial Systems and Aerospace Engineering*, p. 201-206, doi:10.19062/2247-3173.2017.19.1.22
- Ragey, L., 1952, The work of Laussedat and education in photogrammetry at the National School of Arts and Crafts, Paris: *ASPRS Photogrammetric Eng.* v. 18, no. 1, p. 21-26.
- Reis, F.A.G.V., 2001, Curso de geologia ambiental via internet, <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/index.html> (acessado Setembro 2019).
- Remondino, F., e Fraser, C., 2006, Digital camera calibration methods: considerations and comparisons in *IAPRS Proceedings*, V Symposium “Image engineering and vision metrology”, ISPRS Commission V, WG V/1, Dresden, v. 36, part. 5, p. 266-272.
- Reulke, R., 2003, Film-based and digital sensors: augmentation or change in paradigm?, in Fritsch, D., ed., *Proceedings, Photogrammetric Week 3*, Wichmann Verlag, Heideberg, p. 41-52, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo03/reulke.pdf> (acessado Fevereiro 2018).
- Riccomini, C., 1989, *O rift continental do sudeste do Brasil* [Tese de Doutorado] São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 319p.
- Rodriguez, S.K., 1998, *Geologia urbana da Região Metropolitana de São Paulo*. [Tese de Doutorado] São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto Geociências, 60 p.
- Roering, J.J., Mackey, B.H., Marshall, J.A., Sweeney, K.E., Deligne, N.I., Booth, A.M., Handwerger, A.L., e Cеровski-Darriau, C., 2013, You are HERE: connecting the dots with airborne LiDAR for geomorphic fieldwork: *Geomorphology* 2000, p. 172-183.
- Rosa, R., 2005, Geotecnologias na geografia aplicada: *Revista do Departamento de Geografia*, v. 16, p. 81-90, doi:10.7154/RDG.2005.0016.0009.
- Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., e Casagli, N., 2018, Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization: *Landslides*, v. 15, p. 1045-1052, doi:10.1007/s10346-018-0978-0.
- Santos, L.F., Antonelli, T., Lazaretti, A.F., e Pinho, D., 2016, Geological risk overview of the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil, in Aversa, S., Cascini, L., Picarelli, L., Scavia, C., eds., *Landslides and Engineered Slopes: Proceedings*, 12 International Symposium on Landslides, Napoli, v. 1, 8 p., doi:10.1201/9781315375007.
- Schenk, T., 2005, Introduction to photogrammetry: Ohio University, Columbus, 100 p., <http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf> (acessado Fevereiro 2018).
- Schmitt, D., e Gollnick, V., 2016, Historical Development of Air Transport, in *Air Transport System*, XII, c.2, p. 19-38, doi:10.1007/978-3-7091-1880-1_2.

- Schuster, R.L., e Wiecezorek, G.F., 2002, Landslide triggers and types, *in* Rybár, J., Stemberk, J., Wagner, P., eds., *Landslides, Proceedings, First European Conference on Landslides*, Prague, IAEG, Balkema, A.A. Rotterdam, p. 59-78.
- Serifoglu Yilmaz, C., e Güngör, O., 2018, Comparison of the performances of ground filtering algorithms and DTM generation from a UAV-based point cloud, *in* *Proceedings, Geocarto international 2018*, v. 33, no. 5, p. 522-537.
- Serifoglu Yilmaz, C., Yilmaz, V., e Güngör, O., 2017, Ground filtering of a UAV-based point cloud with the Cloth Simulation Filtering algorithm, *in* *Proceedings, International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE): Turkey*, p. 627-630.
- Serifoglu Yilmaz, C., Yilmaz, V., e Güngör, O., 2018, Investigating the performances of commercial and non-commercial software for ground filtering of UAV-based point clouds: *International Journal Remote Sensing*, v. 39, no. 15-16, p. 5016-5042, doi:10.1080/01431161.2017.1420942.
- Silva, C.A., Klauberg, C., Hentz, A.M.K., Corte, A.P.D., Ribeiro, U., e Liesenberg, V., 2018, Comparing the performance of ground filtering algorithms for terrains modeling in forest environment using airborne LIDAR data: *Floresta e Ambiente*, v. 25, no. 2, 10 p., doi:10.1590/2179-8087.015016.
- Singh, A., 1989, Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data: *International Journal Remote Sensing*, v. 10, no. 6, p. 989-1003, doi:10.1080/01431168908903939.
- Sithole, G., e Vosselman, G., 2004, Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 59, p. 85-101.
- Skempton, A.W., Hutchinson, J., 1969, Stability of natural slopes and embankment foundations, *in* *Proceedings, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 7, Mexico, State-of-the-art Volume, p. 291-340.
- Spectra Precision, 2016, SP60 GNSS Receiver: user guise, 62 p.
- Spectra Precision, 2017, SP60 GNSS: especificações técnicas, 4 p.
- Strecha, C., 2011, The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery, *in* Fritsch, D., eds., *Proceedings, Photogrammetric week 11*, p. 289-294, <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/280Strecha.pdf>.
- Streutker, D.R., e Glenn, N.F., 2006, LIDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights in *Remote Sensing of Environment*, 102, p.135-145.
- Tahar, K.N., 2015, Multi rotor UAV at different altitudes for slope mapping studies, *in* *Proceedings, ISPRS International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XL-1/W4, p. 9-16, doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-9-2015.
- Tahar, K.N., Ahmad, A., e Akib, W.A.A.W.M., 2011, Unmanned aerial vehicle technology for low cost landslide mapping, *in* *Proceedings, South East Asia Survey Congress and International Surveyors' Congress, PWTC, Kuala Lumpur*, 10p.
- Tinkham, W.T., Huang, H., Smith, A.M.S., Shrestha, R., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Link, T.E., Glenn, N.F., e Marks, D.G., 2011, A comparison of two open source LiDAR surface classification algorithms: *Remote Sensing*, v. 3, p. 638-649, doi:10.3390/rs3030638.
- Tominaga, L.K., 2012, Escorregamentos, *in* Tominaga, L.K., Santoro, J., Amaral, R., *Desastres naturais: conhecer para prevenir: São Paulo*, Inst. Geológico, p. 11-23.

- Torborg, S., 2018, DJI Phantom 3 Standard Teardown-0. 1 fotografia, cor, <http://www.scotttorborg.com/photo/463> (acessado Fevereiro 2018).
- Trinder, J., e Fritz, L.W., 2008, Historical development of ISPRS, *in* Proceedings, Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book, p. 3-20, doi:10.1201/9780203888445.
- Turner, D., Lucieer, A., e Jong, S.M., 2015, Time series analysis of a landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV): Remote Sensing, v. 7, p. 1736-1757, doi:10.3390/rs70201736.
- U.S. Geological Survey, 2002, Memorial to David J. Varnes: 1919-2002: Geological Society of America Memorials, v. 32.
- U.S. Geological Survey, 2004, Landslide Types and Processes, U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey Fact Sheet 2004-3072 (1.1), 4 p., <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/> (acessado Setembro 2019).
- U.S. Geological Survey, 2017a, Unmanned Aircraft Systems Data Post-Processing, National UAS Project Office, Federal Aviation Administration, <https://uas.usgs.gov/nupo/pdf/PhotoScanProcessingDSLRLMar2017.pdf> (acessado Setembro 2019).
- U.S. Geological Survey, 2017b, Agisoft PhotoScan Workflow, U.S. Geological Survey National UAS Project Office, <https://uas.usgs.gov/nupo/pdf/USGSAgisoftPhotoScanWorkflow.pdf> (acessado Setembro 2019).
- UNAVCO, University NAVSTAR Consortium, 2015, Structure from Motion Introductory Guide, Colorado, Boulder, 18 p., <http://unavco.org> (acessado Junho 2017).
- Vanneschi, C., Eyre, M., Francioni, M., e Coggan, J., 2017, The Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring and Characterization of Slope Instability: Procedia Engineering, v. 191, p. 150-157, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.166.
- Vargas, M., 1966, Estabilização de taludes em encostas de gneiss decompostas, *in* Anais, 3 Congresso Brasileiro de Mecânicas de Solos, Belo Horizonte, Associação Brasileira de Mecânica de Solos, v. 1, tema 6, p. 34-37.
- Varnes, D.J., 1958, Landslide types and processes: Landslides and Engineering Practice, National Research Council, Highway Research Board Special Report 29, p. 20-47.
- Varnes, D.J., 1978, Slope Movement Types and Processes, *in* Schuster, R.L., Krizek, R.J., eds., Landslides, Analysis and Control: Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy of Sciences, p. 11-33.
- Vosselman, G., 2000, Slope based filtering of laser altimetry data, *in* Proceedings, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 33, part B4, p. 935-942.
- Wald, D., Kanamori, H., Helmberger, D.V., e Heaton, T.H., 1983, Source study of the 1906 San Francisco earthquake: Bulletin Seismological Society America, v. 83, no. 4, p. 981-1019, <http://authors.library.caltech.edu/36749/> (acessado Fevereiro 2018).
- Wan, P., Zhang, W., Skidmore, A.K., Qi, J., Jin, X., Yan, G., e Wang, T., 2018, A simple terrain relief index for tuning slope-related parameters of LiDAR ground filtering algorithms: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 10 p., doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.03.020.
- Warrick, J.A., Ritchie, A.C., Adelman, G., Adelman, K., e Limber, P.W., 2017, New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry: Journal of Coastal Research, v. 33, no. 1, p. 39-55, doi:10.2112/JCOASTRES-D-16-00095.1.

- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., e Reynolds, J.M., 2012, 'Structure-from-motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geosciences applications: *Geomorphology*, v. 179, p. 300-314, doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021
- WP/WLI (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1993, *Multilingual Landslide Glossary*: Canada, British Columbia, Richmond, 59 p., isbn: 0-920-505-10-4.
- Yaprak, S., Yildirim, O., Susam-Tokat, T., Inyurt-Zonguldak, S., e Oguz-Tokat, I., 2018, The role of unmanned aerial vehicles in monitoring rapidly occurring landslides: *Geodetski list*, v. 72, no. 95, p. 113-132, <http://hrcak.srce.hr/file/300841> (acessado Setembro 2019).
- Zeybek, M., e Sanlioglu, I., 2019, Point cloud filtering on UAV based point cloud: *Measurement*, v. 133, p. 99-111, doi:10.1016/j.measurement.2018.10.013.
- Zhang, K., Chen, S-C., Whitman, D., Shyu, M-L., Yan, J., e Zhang, C., 2003, A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, no. 4, part I, p. 872-882, doi:10.1109/TGRS.2003.810682.
- Zhang, K., e Whitman, D., 2005, Comparison of three algorithms for filtering airborne LiDAR data: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 71, no. 3, p. 313-324, doi:10.14358/PERS.71.3.313.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., e Yan, G., 2016, An easy-to-use airborne LIDAR data filtering method based on cloth simulation: *Remote Sensing*, v. 8, no. 6, 501, 22 p., doi:10.3390/rs8060501.
- Zhao, X., Su, Y., Li, W., Hu, T., Liu, J., e Guo, Q., 2018, A comparison of LiDAR filtering algorithms in vegetated mountain areas: *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 44, no. 4, p. 287-298, doi:10.1080/07038992.2018.1481738.

PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL POR *STRUCTURE FROM MOTION* DE IMAGENS OBTIDAS EM VOOS DE DIFERENTES ALTURAS SOBRE O SOLO

Luiz Fernando dos Santos¹, Carlos Henrique Grohmann²

¹Instituto de Geociências, Rua do Lago, 562, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), lfsantos_geo@usp.br; ²Instituto de Energia e Ambiente, Avenida Prof. Luciano Gualberto, 1289, Universidade de São Paulo – São Paulo (SP), guano@usp.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o processamento fotogramétrico por *Structure from Motion*, em pacote de software comercial (*Agisoft PhotoScan Professional*), de voos realizados em diferentes alturas constantes sobre o solo de uma mesma área de interesse. Fotografias aéreas obtidas por dois voos, em diferentes alturas, porém constantes, coletados seguidamente, foram processados separadamente e combinados no software por ferramentas próprias. Os resultados foram comparados e analisados com aqueles obtidos pelo processamento conjunto entre os voos.

Palavras-chave — *Structure from Motion*, fotogrametria, *Agisoft PhotoScan Pro*, processamento de imagens aéreas.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to assess the photogrammetric processing by *Structure from Motion* of digital images obtained by flights at different but constant height above ground, on a commercial software package (*Agisoft PhotoScan Professional*) of the same area of interest. Two flights at different heights were responsible for individual aerial image sets collected concomitantly and thus processed separately and combined in software by specific tools. Then, these results were compared and analyzed with those obtained by processing both sets together.

Key words — *Structure from Motion*, photogrammetry, *Agisoft PhotoScan Pro*, aerial image processing.

1. INTRODUÇÃO

As geotecnologias para geociências estão associadas na caracterização, avaliação e solução de problemas decorrentes da ocupação humana do meio físico [1], [2].

Seu uso tem se tornado mais frequente pela facilidade e rapidez para coleta de dados geoespaciais promovidas pelos avanços recentes da tecnologia. Como exemplo, a adoção da prática de prover informações geoespaciais *online* para avaliação e resposta a desastres pelo governo japonês, inclusive utilizando aeronaves remotamente pilotadas para a coleta de dados e construção de modelos 3D em subsídio a mitigação e prevenção de riscos e a resposta e recuperação

de áreas afetadas [3]. O emprego deste tipo de tecnologia para identificação e análise de sinais de instabilidade, acompanhamento e derivação de produtos georreferenciados, representa um significativo passo tecnológico que, apesar de suas limitações, traz benefícios inerentes em detrimento de outras maneiras de captura de dados.

A utilização integrada das geotecnologias permite visualizar informações em áreas específicas em detalhe utilizando dados e modelos 3D, fotografias aéreas ortorretificadas e fotografias oblíquas, com geração de curvas de nível e de modelos digitais de alta resolução.

Parte principal no fluxo de trabalho aerofotogramétrico é o processamento das imagens aéreas adquiridas. As configurações de voo podem refletir diretamente na forma de processar os dados e também em sua qualidade e resolução. Em áreas com diferenças altimétricas significativas, comuns em áreas suscetíveis a processos de movimentos gravitacionais de massa, como os deslizamentos por exemplo, diferentes abordagens de sobrevoo podem ser realizadas (Figura 1), dependentes da plataforma aérea, planejamento de voo e das condições locais.

Figura 1. Configurações de voo para obtenção de resolução e sobreposição quase uniformes em terrenos desníveis: (a) múltiplos voos em sobreposição; (b) voo único seguindo o terreno; (c) voos em sobreposição seguindo o terreno e (d) voos em diferentes alturas em sobreposição e seguindo o terreno (elaborado pelos autores).

Este trabalho objetiva analisar o processamento de imagens obtidas em uma das configurações de sobrevoo (Figura 1.d), comparando processamento individual dos voos #1 e 2, alinhados e juntados pelo software de processamento, com processamento único dos voos #1 e #2.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A plataforma utilizada foi o veículo aéreo não tripulado (VANT) DJI Phantom 4 com receptor GNSS de navegação embarcado (GPS e GLONASS), com precisão variando entre 1 e 10 m. A plataforma tem sensor integrado, câmera fotográfica RGB de 12,4 MP de resolução, com estabilização fornecida por mecanismo de compensação em três eixos (*gimbal*), responsável por estabilizar a câmera na posição de planeamento ou em nadir, por exemplo. Um resumo das principais características da plataforma e sensor consta da Tabela 1 [4]. A resolução (*Ground Sample Distance* – GSD) estimada e cobertura imageada em terreno para as alturas de voo sobre o solo de 50m e 60m podem ser vistas na Figura 2 [5].

A localização nos VANTs é resolvida, na maior parte das vezes, com base em sistemas de posicionamento por satélites, como o GPS e GLONASS de navegação. Além disso, outros sensores são empregados na finalidade como as Unidades de Medições Inerciais (IMUs, do inglês *Inertial Measurement Units*) e dos sensores de bússola, que combinados fornecem uma estimativa de localização global do VANT, permitindo posicionamento em falhas temporárias do GPS. O posicionamento por satélites é sujeito a imprecisões, falhas e degradação do sinal e também não pode ser utilizado para o posicionamento em relação a objetos, de forma que, como mitigação, ocorre a integração de múltiplos sensores para a estimativa de posições [6].

Tabela 1. Principais especificações da plataforma aérea e sensor utilizados.

Plataforma aérea – DJI Phantom 4	
Alcance	5000 m
Autonomia	28 min
Peso	1,38 kg
Tamanho (diagonal)	350 mm
Velocidade	72 km/h
Sistemas GNSS	GPS e GLONASS
Sensor integrado – câmera RGB	
Sensor	1/2,3" CMOS
Resolução	14,4 MP efetivo
Lente	Field of View 94° - 20mm
ISO	100-1600
Obturador Eletrônico	8 - 1/8000 s
Tamanho da Imagem	4000 x 3000 pixel

A falta de precisão do posicionamento e orientação das imagens pelo sistema embarcado de navegação é mitigada durante o processamento. Dependendo do tipo de aplicação da fotogrametria aérea podem-se utilizar apenas as informações do GPS de navegação uma vez que a acurácia pode chegar até 2m em imagens de baixa-altura.

Figura 2. (a) cobertura a uma altura de voo sobre o solo de 50m: 5.738m² com GSD teórico de 2.19 cm/pix; (b) e para uma altura de 60m: 8.263m² de cobertura estimada e GSD teórico de 2.63 cm/pix.

Já para o processamento com pontos de apoio considerase que a acurácia alcança entre 0,05 e 0,2m, dependente do GSD das imagens (da altura sobre o solo de voo) [7].

As aquisições das imagens aéreas, realizadas por meio da plataforma aérea e sensor discriminados, ocorreram mediante planeamento de missão de voo prévio, por meio de aplicativo especializado (Figura 3).

O aplicativo utilizado, MapPilot da DronesMadeEasy [8], permite a inserção de um MDE, através da função *Terrain Awareness* que utiliza dados da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 30 m/pixel, para que a altura sobre o solo em terrenos desníveis seja aproximadamente constante. O planeamento de voo considera as informações do terreno para os blocos fotogramétricos e linhas de voo automaticamente. Assim, permite uma resolução e sobreposição entre imagens aproximadamente constante, gerando uma aquisição de dados consistente mesmo em terrenos declivosos ou irregulares, como aqueles suscetíveis a movimentos de massa.

Os conjuntos de imagens foram processados no *software* comercial Agisoft PhotoScan Professional [9]. Este programa representa o pacote de soluções fotogramétricas por *Structure from Motion* e *Multiview Stereo* (SfM-MVS) mais acessível comercialmente atualmente. Sua solução é completa em termos de fluxo de trabalho SfM-MVS e bastante utilizado para aplicações em geociências [10].

SfM-MVS é uma técnica fotogramétrica, que como a fotogrametria convencional, objetiva gerar medidas 3D. No entanto, o SfM utiliza um conjunto de algoritmos das ciências de visão computacional que facilitam a extração de medidas de imagens bidimensionais, quando sobrepostas umas às outras e tomadas de diferentes orientações e posições, através da detecção e alinhamento automático de feições em múltiplas imagens para triangular suas posições e gerar nuvens de pontos em três dimensões. Também é conhecido como fotogrametria de múltiplas visadas ou *multi-view photogrammetry* [11], [12].

A técnica pode ser resumida em múltiplas exposições da área de interesse tomadas em diferentes posições com uma câmera digital gerando as imagens digitais. Um identificador e descritor analisa o conjunto de imagens identificando os pontos de feições em comum suficientes para estabelecer relações espaciais entre as localizações das imagens originais em um sistema arbitrário de coordenadas 3D [13]. O descritor mais comum utilizado é o *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), proveniente da visão computacional, é essencial para a calibração da câmera, registro entre as imagens, reconhecimento de objetos e sua reconstrução tridimensional [14].

Todos os processamentos seguiram o seguinte procedimento metodológico, interno ao Agisoft PhotoScan Pro: criação de um bloco de trabalho (*chunk*), adição das fotografias por voo e em conjunto, separados pelos blocos, conversão das coordenadas para as de projeto, remoção das fotografias desfocadas, identificação (descritor SIFT) e correspondência entre pontos (pontos homólogos), alinhamento entre pares de fotografias aéreas, reconstrução da geometria e *bundle adjustment* (*optimize*) para melhoria da geometria 3D do modelo gerado.

3. RESULTADOS

Foram realizados dois voos na data de 11/10/2017, onde foram capturadas 155 fotografias no total, a partir do DJI Phantom 4. O primeiro voo (voo #1) foi configurado a uma altura sobre o solo de 50m (GSD teórico de 2,19 cm/pix) e o segundo (voo #2) a 60m (GSD teórico de 2,63 cm/pix), com recobrimento suficiente entre eles para que houvesse possibilidade de processamento conjunto, único.

O aplicativo de planejamento e controle de voo utilizado foi o MapPilot da Drones Made Easy, por permitir voos com altura sobre o solo quase constante devido à possibilidade de se utilizar MDE para alinhar o voo ao terreno (Figura 4).

As imagens foram obtidas em formato RAW (DNG), cuja característica principal é a de não ter nenhuma compressão, preservando a qualidade e tornando os arquivos como referência. Em seguida ocorreu conversão para JPG para facilitar a manipulação e processamento.

Os voos foram processados no software Agisoft PhotoScan Professional, com os parâmetros de entrada padronizados e recomendados no manual do desenvolvedor,

Figura 3. (a) planejamento de voo em escritório por meio de aplicativo para dispositivo móvel (captura de tela do MapPilot); (b) conferência, em campo, pré-voo dos parâmetros para aquisição de dados (foto: José Fernando P. dos Santos).

Figura 4. Rastreamento do VANT com base nos voos realizados para aquisição de imagens aéreas da área de pesquisa em (a) visão em planta e (b) oblíqua (imagens: Google Earth).

da seguinte forma: separados em (1) voo #1 e (2) voo #2, com posterior (3) alinhamento (*align*) e junção (*merge*) dentro do *software* por ferramentas próprias e, por fim, (4) em um único processamento dos voos #1 e #2, combinados. Os resultados estão resumidos na Tabela 2.

4. DISCUSSÃO

Ao comparar os voos #1 e #2 de diferentes alturas observa-se o aumento do erro de reprojeção com o aumento da altura média sobre o solo. Este comportamento é esperado uma vez que as feições do terreno são menos reconhecidas em cada imagem aérea fazendo com que a busca por pontos homólogos pelo identificador e descritor SIFT seja dificultada. Com o aumento da altura do voo ocorre o esperado aumento do valor da resolução GSD e do erro total de posicionamento (considerando o GNSS embarcado).

O Agisoft PhotoScan Pro calcula o GSD para cada um dos casos, como pode ser visto pelos valores de resolução média para cada um dos processamentos. Os valores são ligeiramente diferentes entre o processamento por alinhamento e junção (*align* e *merge*) dos individuais, realizados por uma ferramenta própria ao *software* e o processamento único. Os valores obtidos pela junção se aproximam mais de uma média aritmética do que os obtidos pelo processamento único.

Em termos de pontos válidos encontrados, o processamento único leva vantagem numérica, 173.435 pontos, por não depender dos processamentos individuais, onde as fotografias aéreas são analisadas pelo *software* em sua totalidade, contra os 169.166 pontos válidos do processamento individual seguido de junção.

Tabela 2. Comparação entre processamentos automáticos no Agisoft PhotoScan Professional dos voos #1 e #2 realizados em alturas sobre o solo diferentes, com sobreposição entre eles.

Propriedades	1	2	3	4
Altura média sobre o solo (m)	60,6	88,5	71,9	71,4
GSD médio (cm/pix)	2,67	3,77	3,12	3,07
Câmeras alinhadas/total	88/95	60/60	148/155	148/155
Pontos homólogos válidos/total	83.374/	85.792/	165.166/	173.435/
	87.288	89.742	177.030	181.727
Projeções	191.266	201.914	393.180	404.657
Erro reprojeção RMS (pix)	0,32	0,53	0,44	0,46
Erro reprojeção máx. (pix)	7,38	16,58	16,58	17,10
Georreferenciamento (GNSS de navegação embarcado)				
Erro total (m)	1,26	2,30	1,77	1,85
Erro X (m)	0,56	1,01	0,75	0,80
Erro Y (m)	1,01	1,70	1,33	1,37
Erro Z (m)	0,52	0,95	0,90	0,95

¹voos #1, ²voos #2, ³alinhamento (*align*) e junção (*merge*) dos voos #1 e #2 no *software*; ⁴processamento único dos voos #1 e #2.

O erro posicional entre os processamentos não varia significativamente, considerando o erro do GNSS embarcado. Como esperado os erros são menores quanto menor a altura de voo sobre o solo e se aproximam de uma média ao juntar ou processar as imagens.

5. CONCLUSÕES

Não ocorrem diferenças significativas entre o processamento individual para os diferentes voos, com posterior alinhamento seguido de junção *in software*, e o processamento único ou combinado dos voos. No entanto, em termos de processamento único, o número de pontos válidos é maior e a resolução ligeiramente menor.

As diferenças entre os erros de reprojeção (RMS e máximo) produzidos para as duas formas de processamento podem ser devido ao número diferente de pontos homólogos válidos identificados, com a tendência a ser maior no processamento único, que também tem maior número de pontos válidos.

Desta forma, em casos de aquisições aéreas distintas a diferentes alturas constantes de voo sobre o solo, desde que tenham recobrimento suficiente, os dados sugerem que o processamento dos conjuntos de imagens obtidas por diferentes voos seja único, otimizando a etapa de processamento.

6. AGRADECIMENTOS

À FAPESP (proc. #2016/006628-0) pelo apoio financeiro, à Defesa Civil de São Paulo/Perus pelo suporte em campo, ao SGB-CPRM pelo apoio a L.F.S. e ao pessoal do SpamLab (IEE-USP) pelas discussões e suporte em campo. C.H.G. é bolsista de Produtividade CNPq (307647/2015-3).

7. REFERÊNCIAS

- [1] Rosa, R. "Geotecnologias na geografia aplicada". *Revista do Departamento de Geografia*, v.16, pp.81-90, 2005.
- [2] Bitar, O.Y.; Iyomasa, W.S. e Cabral Jr., M. "Geotecnologia: tendências e desafios", *São Paulo Perspectiva*, v.14, n.3, 2000.
- [3] GSI-DCG - Geospatial Information Authority of Japan, Geospatial Information Department Disaster Countermeasures Group Responses of Geospatial Inf. Dept. to the 2016 Kumamoto Quake. 2016 Disponível em: <<http://www.gsi.go.jp/>>. 2017.
- [4] DJI DJI - The future of possible. Disponível em: <<http://www.dji.com/>>. Acesso em: 15 out. 2018.
- [5] Dietrich, J. *offNadir_resolution_v1-0.py*. Disponível em: <https://github.com/geojames/py_offNadir_Res>. Acesso em: 09 mai. 2018.
- [6] Menno, L.; Caballero, F.; Forssen, P.; Wildhild, I.; Fernz, J.R.; Martínez-de-Dios, A.; Moe, K.; Nordberg, K. e Ollerio, A. "Single and Multi-UAV Relative Position Estimation Based on Natural Landmarks". *Adv. Unmanned Aerial Vehicles*, pp.267-307, 2007.
- [7] Kang, O.; Srecha, C.; Beyeler, A.; Zufferey, J.; Floreano, D. e Fua, P. "The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery". *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-1/C22, pp.6, 2011.
- [8] MapPilot for DJI Drones Made Easy. Disponível em: <<http://dronesmadeeasy.com/>>. 2018.
- [9] Agisoft PhotoScan Professional (Version 1.4.2) (Software). Disponível em: <<http://www.agisoft.com/downloads/>>. 2018.
- [10] Carrivick, J.L. Smith, M.W. e Quincey, D.J. "Structure from Motion in the Geosciences". Wiley Blackwell, USA, pp.197, 2016.
- [11] Westoby, M.J. "Structure from Motion photogrammetry: a low cost, effective tool for geoscience applications". *Geomorphology*, v.179, pp.179-300, 2012.
- [12] Peterson, E.B.; Klein, M. e Stewart, R.L. "Whitepaper on Structure from Motion (SfM) Photogrammetry: Constructing Three Dimensional Models from Photography", EUA, pp.46, 2015.
- [13] Michelletti, N.; Chandler, J.H. e Lane, S.N. "Structure from motion (SfM) photogrammetry". *Geomorphological techniques*, chap.2 sec. 2.2, 2015.
- [14] Lowe, D.G. "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". *Int. Journal of Computer Vision*, pp.28, 2004.

Para voos de **VANT**, com alturas sobre o solo distintas, **não ocorrem diferenças significativas** entre o processamento individual de cada voo, juntando-os depois, e o processamento único e conjunto dos voos.

PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL POR *STRUCTURE FROM MOTION* DE IMAGENS OBTIDAS EM VOOS DE DIFERENTES ALTURAS SOBRE O SOLO.

Luiz Fernando dos Santos¹, Carlos Henrique Grohmann²

INTRODUÇÃO

- Processamento das imagens obtidas por VANT é parte principal do fluxo fotogramétrico *SfM*. As configurações de voo podem refletir diretamente na forma de processar os dados e também em sua qualidade e resolução.
- Em áreas com grandes diferenças altimétricas, comuns em **áreas suscetíveis a processos de movimentos de massa**, diferentes abordagens de sobrevoo podem ser realizadas, dependentes da plataforma aérea, planejamento de voo e condições locais.
- Objetivo: analisar o processamento de imagens obtidas em uma destas configurações de sobrevoo, comparando processamento individual dos voos denominados #1 e #2, alinhados e vinculados, com processamento único dos voos #1 e #2.

MATERIAIS E MÉTODOS

- DJI Phantom 4, Receptor GNSS;
- DronesMadeEasy MapPilot, Agisoft PhotoScan Professional;
- Duas aquisições justapostas de imagens aéreas com alturas sobre o solo distintas;
- Processamento *SfM* para reconstrução das nuvens de pontos esparsas e comparação.

RESULTADOS

Parâmetros	Voo #1 Voo único	Voo #2 Voo único	Voo #1 e #2 alinhados	Voo #1 e #2 conjuntos
Altura sobre o solo média (m)	80,6	88,5	71,8	75,4
GSD médio (cm/pix)	2,67	3,77	3,12	3,07
Totais alinhados/ total	88 / 95	90 / 103	148 / 155	149 / 155
Pontos válidos/ total	83.374 / 87.282	85.782 / 89.742	109.106 / 177.030	173.435 / 181.737
Projeções	201.268	201.914	303.180	404.857
Erro reprojeção RMS (pix)	0,32	0,33	0,44	0,46
Erro reprojeção Máx. (pix)	7,38	15,58	16,58	17,10
Erro total (m)	1,26	2,30	1,77	1,85
Erro X (m)	0,56	1,01	0,75	0,80
Erro Y (m)	1,01	1,70	1,33	1,37
Erro Z (m)	0,52	0,95	0,90	0,95
Erro (m) / (GSD)			0,04 / 0,07	0,03 / 0,07

CONCLUSÕES

- Não ocorrem diferenças significativas entre o processamento individual para os diferentes voos, com posterior alinhamento e *merge*, e processamento único dos voos.
- A etapa de alinhamento e junção entre os voos no *software* é propensa a embutir erros na nuvem de pontos final.
- Para aquisições distintas a diferentes alturas constantes de voo sobre o solo, com recobrimento, os resultados sugerem que o **processamento dos voos seja único, em conjunto, otimizando a etapa e minimizando eventuais erros e ruídos.**

¹ MSc do Programa de Pós-Graduação em Geociências, Área de Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Pesquisador do Serviço Geológico do Brasil-CPRM.
lf@usp.br

² Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo. Coordenador SPAMLab.

Agradecimentos: à FAPESP (proc. #2016/06628-0) pelo apoio financeiro; à Defesa Civil de São Paulo e de Perus pelo suporte em campo, ao SGB-CPRM pelo apoio a LFS e ao pessoal do SPAMLab pelas discussões e suporte em campo. E.H.S. é bolsista de Produtividade CNPq (304413/2016-6).

Fotografe para acessar artigo e pôster.

GEOCIÊNCIAS
Instituto de Geociências USP

APÊNDICE B – Rotina Python para processamento SfM.

```

1. import os # sistema operacional
2. import Metashape as PS # Agisoft Metashape
3. from datetime import datetime # classes de data/tempo
4. import itertools as it # criação de iteradores
5.
6. def open_markers(path, var): # função: abrir pts apoio do txt
7.     if var == 0: # cria e carrega apenas nomes (depois obs)
8.         with open(path, "rt") as f:
9.             for line in f:
10.                 if line.startswith("#") or line.startswith("\n"):
11.                     continue
12.                 else:
13.                     split = line.rsplit(",", 8)
14.                     marker_name = split[0]
15.                     chunk.addMarker() # addMarker()
16.                     chunk.markers[-1].label = marker_name
17.             else: # carrega coordenadas 3D pts apoio
18.                 with open(path, "rt") as f:
19.                     for line in f:
20.                         if line.startswith("#") or line.startswith("\n"):
21.                             continue
22.                         else:
23.                             split = line.rsplit(",", 8)
24.                             marker_name = split[0]
25.                             cx = float(split[1]) #marker.reference.location
26.                             cy = float(split[2])
27.                             cz = float(split[3])
28.                             ax = float(split[4]) #marker.reference.accuracy
29.                             ay = float(split[5])
30.                             az = float(split[6])
31.                             for mk in chunk.markers:
32.                                 if mk.label == marker_name:
33.                                     mk.reference.location = PS.Vector([cx,cy,cz])
34.                                     mk.reference.accuracy = PS.Vector([ax,ay,az])
35.                                     f.close()
36.
37. def open_proj_markers(path): # função: coord 2D pts apoio
38.     with open(path, "rt") as f:
39.         for line in f:
40.             if line.startswith("#") or line.startswith("\n"):
41.                 continue
42.                 else:
43.                     split = line.rsplit(",", 4)
44.                     marker_name = split[0] # ponto de apoio
45.                     cam_name = split[1] # imagem do ponto
46.                     x2d = float(split[2]) # coord img X (pix)
47.                     y2d = float(split[3]) # coord img Y (pix)
48.                     cc = chunk.cameras
49.                     mm = chunk.markers
50.                     for i in range(len(cc)): # para cada img
51.                         if cc[i].label.upper() == cam_name.upper():
52.                             # pega largura e altura da imagem
53.                             width = cc[i].sensor.width
54.                             height = cc[i].sensor.height
55.                             for j in range(len(mm)): # cada pt apoio
56.                                 if mm[j].label == marker_name:
57.                                     # se coord 2D cabe na imagem
58.                                     if (0 <= x2d < width) and (0 <= y2d
59.                                     < height):
60.                                         # projeta a coord 2D da foto
61.                                         psm = PS.Marker.Projection
62.                                         psv = PS.Vector
63.                                         # True = fixada (green flag)
64.                                         mm[j].projections[cc[i]] = psm(
65.                                         psv([x2d, y2d]), True)
66.                                         f.close()
67.
68. def check_iscontrol(path): # função: pts controle ou verif
69.     with open(path, "rt") as f:
70.         for line in f:
71.             if line.startswith("#") or line.startswith("\n"):
72.                 continue
73.                 else:
74.                     split = line.rsplit(",", 8)
75.                     marker_name = split[0]
76.                     iscontrol = int(split[7])
77.                     for marker in chunk.markers:
78.                         if marker.label.upper() == marker_name.upper():
79.                             if iscontrol == 1: # se ponto controle
80.                                 marker.reference.enabled = True
81.                             else: # ou verificação
82.                                 marker.reference.enabled = False
83.                     f.close()

```

```

74. def allMarkers(): # função: todos pts apoio como controle
75.     for marker in chunk.markers:
76.         marker.reference.enabled = True
77.
78. def prange(a, b, i): # função: cria intervalo floats
79.     if isinstance(a, int): # se var é inteiro
80.         if a < b:
81.             p = 10**i
82.             sr, er = (a*p, (b*p) + 1)
83.             p = float(p)
84.             listx = []
85.             for n in range(sr, er, 1):
86.                 x = n/p
87.                 listx.append(x)
88.             return listx
89.         elif a > b:
90.             p = 10**i
91.             sr, er = (a*p, (b*p) - 1)
92.             p = float(p)
93.             listx = []
94.             for n in range(sr, er, -1):
95.                 x = n/p
96.                 listx.append(x)
97.             return listx
98.         else: # a == b
99.             print("Definir intervalo válido!\n")
100.     else: # ou se var é float
101.         rou_nd = lambda x,n : x*(10**n)//1/(10**n)
102.         a, b = (int(a * 10), int(b * 10))
103.         if a < b:
104.             p = 10**i
105.             sr, er = (a*p, (b*p) + 1)
106.             p = float(p)
107.             listx = []
108.             for n in range(sr, er, 1):
109.                 x = (n/p) / 10
110.                 x = rou_nd(x, i+1)
111.                 listx.append(x)
112.             return listx
113.         elif a > b:
114.             p = 10**i
115.             sr, er = (a*p, (b*p) - 1)
116.             p = float(p)

```

```

117.         listx = []
118.         for n in range(sr, er, -1):
119.             x = (n/p) / 10
120.             x = rou_nd(x, i+1)
121.             listx.append(x)
122.         return listx
123.     else: # a == b
124.         print("Definir intervalo válido!\n")
125.
126. def resBbox(): # função: reduzir região processamento
127.     region = chunk.region
128.     T = chunk.transform.matrix
129.     m = PS.Vector([10E+10, 10E+10, 10E+10])
130.     M = -m
131.     for point in chunk.point_cloud.points:
132.         if not point.valid:
133.             continue
134.         coord = T * point.coord
135.         coord.size = 3
136.         coord = chunk.crs.project(coord)
137.         for i in range(3):
138.             m[i] = min(m[i], coord[i])
139.             M[i] = max(M[i], coord[i])
140.     center = (M + m) / 2
141.     size = M - m
142.     region.center = T.inv().mulp(chunk.crs.unproject(center))
143.     region.size = size * (1 / T.scale())
144.     v_t = T * PS.Vector([0, 0, 0, 1])
145.     v_t.size = 3
146.     R = chunk.crs.localframe(v_t) * T
147.     region.rot = R.rotation().t()
148.     chunk.region = region
149.
150. def getPDFreport(path, i=[0]): # função: relatório PDF
151.     i[0] += 1
152.     print("Relatório PDF {} \n".format(i))
153.     chunk.exportReport(path + str(i) + ".pdf")
154.
155. def getResidualErrors(path, i=[0]): # função: erro reproj
156.     i[0] += 1 # contagem do uso da função
157.     point_cloud = chunk.point_cloud # nuvem de pts
158.     points = point_cloud.points # pts da nuvem
159.     npoints = len(points) # no. pts da nuvem

```



```

160. projections = point_cloud.projections # projeções nuvem
161. err_sum, num, maxe = (0, 0, 0) # contagem dos erros
162. f = open(path + "/Residuos_2_IMAGEM_" + str(i) + ".txt", "wt")
163. f.write("#Imagens\tN_proj\tErro_pix\t\n")
164. f2 = open(path + "/Residuos_3_MEDMAX_" + str(i) + ".txt", "wt")
165. f2.write("#N_pts\tErroRMSpix\tErroMAXpix\t\n")
166. for cam in chunk.cameras: # para cada img do bloco
167.     if not cam.transform: # se não alinhada...
168.         continue # pula esta img
169.     pIndex, cam_num, cam_err = (0, 0, 0) # contagens
170.     for proj in projections[cam]: # p/ cada proj/camera
171.         track_id = proj.track_id # índice das projeções
172.         # enquanto índices < no. pts (válidos) e total
173.         while pIndex < npoints and points[pIndex].track_id < track_id:
174.             pIndex += 1 # aumenta contagem índice pts
175.             # se índice pts < no. pts nuvem e pto igual do idx proj
176.             if pIndex < npoints and points[pIndex].track_id == track_id:
177.                 if not points[pIndex].valid: # se pto não válido...
178.                     continue # pula
179.                 # para os pts válidos:
180.                 coord = points[pIndex].coord # coord vetor por pto
181.                 # retorna escalar de vetor ao quadrado
182.                 dist = cam.error(coord, proj.coord).norm() ** 2
183.                 err_sum += dist # soma dos erros ao quadrado
184.                 num += 1 # conta uma projeção (soma total)
185.                 cam_num += 1 # projeção por imagem
186.                 cam_err += dist # soma dos erros ao quadrado
187.                 if dist > maxe: # erro máx por projeção
188.                     maxe = dist # sempre que dist > maxe
189.                 cam_avg = (cam_err / cam_num) ** (5/10) # erro por img
190.                 f.write("{}\t{}\t{:.6f}\t\n".format(cam.label, cam_num, cam_avg))
191.                 f.close()
192.                 err_avg = (err_sum / num) ** (5/10) # erro médio do bloco
193.                 maxe_sq = maxe ** (5/10) # erro máximo do bloco (por proj)
194.                 f2.write("{}\t{}\t{:.6f}\t{:.6f}\n".format(npoints, err_avg, maxe_sq, q))
195.                 f2.close()
196.                 return err_avg
197.
198. def getMarkerErrors(path, i=[0]):
199.     i[0] += 1
200.     file = open(path + "/Residuos_4_PTAP0IO_" + str(i) + ".txt", "w")
201.     file.write("#Ponto\tErrX_pix\tErrY_pix\t\tN_proj\tErr_pto\n")
202.     terro, tnum = (0, 0)
203.     for marker in chunk.markers: # p/ cada pto apoio
204.         if not marker: # se não há pts apoio
205.             continue # pula
206.         if not marker.position: # se pto apoio sem coord 3D
207.             continue # pula
208.         if not marker.projections: # se pto nao tem observacoes
209.             continue # pula
210.         err_sum, num = (0, 0)
211.         for camera in marker.projections.keys(): # imgs/pto apoio
212.             if not camera.transform: # se não alinhadas
213.                 continue # pula
214.             proj = marker.projections[camera].coord
215.             reproj = camera.project(marker.position)
216.             erro = (proj - reproj).norm() ** 2
217.             err_sum += erro
218.             terro += erro
219.             num += 1
220.             tnum += 1
221.         file.write("{}\t{}\t{:.6f}\n".format(marker.label, num, ((err_sum / num) ** (5/10))))
222.         erro_total = ((terro / tnum) ** (5/10))
223.         file.write("Erro total: {:.6f}".format(erro_total))
224.         return erro_total
225.
226. def exportCons(path_cons, cont): # função: salvar log
227.     print("Salvar log em arquivo texto!")
228.     f = open(path_cons, "wt")
229.     f.write(cont)
230.     f.close()
231.
232. def afr(var): # função: ajustamento por feixes de raios (AFR)
233.     if var == 0: # MODELO B: f,Cx,Cy,K1,K2,K3,P1,P2 (8 POI)
234.         chunk.optimizeCameras(fit_f=True, fit_cx=True, fit_cy=True,
235.                               fit_b1=False, fit_b2=False, fit_k1=True,
236.                               fit_k2=True, fit_k3=True, fit_k4=False,
237.                               fit_p1=True, fit_p2=True, fit_p3=False,
238.                               fit_p4=False, adaptive_fitting=False,
239.                               tiepoint_covariance=True)

```

```

239. def fRecUn_noloop(f_a, f_b, f_i): # função: filtro incert rec.
240.     sb = 50 * "-" # barra divisória para impressão console
241.     print("{}\n1. Incerteza da Reconstrução\n{}".format(sb, sb))
242.     f_RecUn = prange(f_a, f_b, f_i) # 0. limiares filtragem
243.     f = PS.PointCloud.Filter() # 1. Filter() definido como f
244.     spc0 = len(chunk.point_cloud.points) # 2. no. pts inicial
245.     sigma0 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # 3. sigma0
246.     print("Tiep[0]: {} \nSigma[0]: {:.6f}\n".format(spc0, sigma0))
247.     a = 0 # 4. no. vezes que pts foram removidos
248.     for idx, i in enumerate(f_RecUn):
249.         f.init(chunk, # 5. p/ cada limiar inicia filtro
250.                 criterion=PS.PointCloud.Filter.ReconstructionUncert
251.                 ainty)
252.         spc = len(chunk.point_cloud.points) # 6. no. pts
253.         f.selectPoints(i) # 7. seleciona pts com base limiar
254.         # 8. no. pts selecionados
255.         psel = len([p for p in chunk.point_cloud.points if p.selected])
256.         perc = round(psel * 100 / spc, 2) # 9. % pts selec
257.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # 10. opt
258.         print("Limiar: {} - {} ({}%) pts".format(i, psel, perc))
259.         f.resetSelection() # 11. remove a seleção de pts
260.         if psel == 0: # se nenhum pto selecionado com limiar
261.             print("\nLimiar: {} - não seleciona pts".format(i))
262.             continue # 12. pula e passa p/ próximo limiar
263.         elif perc >= 5 and a <= 9: # 13. >10% selec, até 10rem
264.             a += 1 # 14. adiciona +1: remoção de pts
265.             # 15. guarda os valores calculados
266.             spcN, pselN, percN, sigmaN = (spc, psel, perc, sigma)
267.             print("\nRemoção de Pontos #{}\n{}\n"
268.                   "Intervalo: {} (idx.{}))".format(a, sb, i, idx))
269.             f.removePoints(i) # 16. remove pts, base limiar
270.             PS.app.update() # 17. atualiza visualização
271.             # 18. AFR: refinar orientações externa/interna
272.             print("\nAjustamento Feixe Raios\n{}\n".format(sb))
273.             afr(0) # Modelo C
274.             print("{}".format(sb))
275.             # 19. atualiza valores de spc/sigma0 após remoção
276.             spc = len(chunk.point_cloud.points)
277.             sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0'])
278.             # 20. imprime console condições da remoção pts
279.             print("{} - {} ({}%) = {} \nSigma[0]: {:.6f} -
280.             gma, sb))
281.             else: # 21. psel != 0 e perc < 5
282.                 continue # pula limiar e passa ao próximo
283.             spc1 = len(chunk.point_cloud.points) # 22. no. pts final
284.             sigma1 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # 23. sigma0
285.             print("Sigma0: {:.6f} -> {:.6f}\nTiepoints: {} -
286.             > {} \n{} \n"
287.             """.format(sigma0, sigma1, spc0, spc1, sb))
288.
289. def fProjAcc_noloop(f_a, f_b, f_i): # função: filtro acur. proj
290.     sb = 50 * "-" # barra divisória para impressão console
291.     print("{}\n2. Acurácia da Projeção\n{}".format(sb, sb))
292.     f_ProjAcc = prange(f_a, f_b, f_i) # limiares filtragem
293.     f = PS.PointCloud.Filter() # Filter() definido como f
294.     spc0 = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts inicial
295.     sigma0 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # sigma0
296.     print("Tiep[0]: {} \nSigma[0]: {:.6f}\n".format(spc0, sigma0))
297.     a = 0 # no. vezes que pts foram removidos
298.     for idx, i in enumerate(f_ProjAcc): # p/ cada init filtro
299.         f.init(chunk, criterion=PS.PointCloud.Filter.ProjectionAc
300.                 curacy)
301.         spc = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts
302.         f.selectPoints(i) # seleciona pts com base limiar
303.         psel = len([p for p in chunk.point_cloud.points if p.selected])
304.         perc = round(psel * 100 / spc, 2) # % pts selecionados
305.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # otimizado
306.         print("Limiar: {} - {} ({}%) pts".format(i, psel, perc))
307.         f.resetSelection() # remove a seleção de pts
308.         if psel == 0: # se nenhum pto selecionado com limiar
309.             print("\nLimiar: {} - não seleciona pts".format(i))
310.             continue # pula e passa p/ próximo limiar
311.         elif perc >= 5 and a <= 9: # >10%, até 10 remoções
312.             a += 1 # adiciona +1: remoção de pts
313.             spcN, pselN, percN, sigmaN = (spc, psel, perc, sigma)
314.             print("\nRemoção de Pontos #{}\n{}\n"
315.                   "Intervalo: {} (idx.{}))".format(a, sb, i, idx))
316.             f.removePoints(i) # remove pts, base limiar
317.             PS.app.update() # atualiza visualização
318.             print("\nAjustamento Feixe Raios\n{}\n".format(sb))
319.             afr(0) # Modelo B
320.             print("{}".format(sb))

```

```

318.         spc = len(chunk.point_cloud.points)
319.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0'])
320.         print("{} - {} ({:.1f}%) = {} \nSigma0: {:.6f} -
> {:.6f} \n{} \n"
321.               "\n".format(spcN, pselN, percN, spc, sigmaN, sigmaN,
gma, sb))
322.         else: # psel != 0 e perc < 5
323.             continue # pula limiar e passa ao próximo
324.         spc1 = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts final
325.         sigma1 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # sigma0 final
326.         print("Sigma0: {:.6f} -> {:.6f} \nTiepoints: {} -
> {} \n{} \n"
327.               "".format(sigma0, sigma1, spc0, spc1, sb))
328.
329. def fRepError_loop(f_a, f_b, f_i): # função: filtro erro reproj
330.     sb = 50 * "-" # barra divisória para impressão console
331.     print("{} \n3. Erro de Reprojeção \n{}".format(sb, sb))
332.     f_RepError = prange(f_a, f_b, f_i) # limiares filtragem
333.     f = PS.PointCloud.Filter() # Filter() definido como f
334.     spc0 = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts inicial
335.     sigma0 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # sigma0
336.     print("Tiep[0]: {} \nSigma[0]: {:.6f} \n".format(spc0, sigma0))
337.     a, b = (0, 0) # no. remoções, no. repetições
338.     for idx, i in enumerate(it.cycle(f_RepError)): # loop
339.         f.init(chunk, criterion=PS.PointCloud.Filter.ReprojectionEr
ror)
340.         spc = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts
341.         f.selectPoints(i) # seleciona pts com base limiar
342.         psel = len([p for p in chunk.point_cloud.points if p.select
ed])
343.         perc = round(psel * 100 / spc, 2) # % pts selecionados
344.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # otimizado
345.         print("Limiar: {} - {} ({}) pts".format(i, psel, perc))
346.         f.resetSelection() # remove a seleção de pts
347.         b += 1 # adiciona +1 contador ciclos (loop infinito)
348.         if a > 10 or b > 14: # >10 remoções / 15 ciclos loop
349.             break # assegura atingir menor limiar definido
350.         elif psel == 0: # se nenhum pto selec com limiar
351.             print("Limiar: {} -
> não há pts selecionáveis".format(i))
352.             continue # próximo limiar (loop infinito)
353.         elif a <= 10: # selc todos pts, até 10 remoções
354.             a += 1 # adiciona +1: remoção de pts
355.         spcN, pselN, percN, sigmaN = (spc, psel, perc, sigma)
356.         print("\nRemoção de Pontos #{} \n{} \n"
357.               "Intervalo: {} (idx.{}))".format(a, sb, i, idx))
358.         f.removePoints(i) # remove pts, base limiar
359.         PS.app.update() # atualiza visualização
360.         print("\nAjustamento Feixe Raios \n{} \n".format(sb))
361.         afr(0) # Modelo B
362.         print("{}".format(sb))
363.         spc = len(chunk.point_cloud.points)
364.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0'])
365.         print("{} - {} ({:.1f}%) = {} \nSigma0: {:.6f} -
> {:.6f} \n{} \n"
366.               "\n".format(spcN, pselN, percN, spc, sigmaN, sigmaN,
a, sb))
367.         spc1 = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts final
368.         sigma1 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # sigma0 final
369.         print("Sigma0: {:.6f} -> {:.6f} \nTiepoints: {} -
> {} \n{} \n"
370.               "".format(sigma0, sigma1, spc0, spc1, sb))
371.
372. def fImgCount_noloop(f_a, f_b, f_i): # função: filtro cont img
373.     sb = 50 * "-" # barra divisória para impressão console
374.     print("{} \n4. Contagem de Imagem \n{}".format(sb, sb))
375.     f_ImgCount = prange(f_a, f_b, f_i) # limiares filtragem
376.     f = PS.PointCloud.Filter() # Filter() definido como f
377.     spc0 = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts inicial
378.     sigma0 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # sigma0
379.     print("Tiep[0]: {} \nSigma[0]: {:.6f} \n".format(spc0, sigma0))
380.     a = 0 # no. de vezes que pts foram removidos
381.     for idx, i in enumerate(f_ImgCount): # p/ cada init filtro
382.         f.init(chunk, criterion=PS.PointCloud.Filter.ImageCount)
383.         spc = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts
384.         f.selectPoints(i) # seleciona pts com base limiar
385.         psel = len([p for p in chunk.point_cloud.points if p.sele
cted])
386.         perc = round(psel * 100 / spc, 2) # % pts selecionados
387.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # otimizado
388.         print("Limiar: {} - {} ({}) pts".format(i, psel, perc))
389.         f.resetSelection() # remove a seleção de pts
390.         if psel == 0: # se nenhum pto selecionado com limiar
391.             print("\nLimiar: {} - não seleciona pts".format(i))
392.             continue # pula e passa p/ próximo limiar

```

```

393.     elif perc <= 50 and a <= 1: # <10% selec, até 2 remoções
394.         a += 1 # adiciona +1: remoção de pts
395.         spcN, pselN, percN, sigmaN = (spc, psel, perc, sigma)
396.         print("\nRemoção de Pontos #{}\n{}\n"
397.               "Intervalo: {} (idx.{})".format(a, sb, i, idx))
398.         f.removePoints(i) # remove pts, base limiar
399.         PS.app.update() # atualiza visualização
400.         print("\nAjustamento Feixe Raios\n{}\n".format(sb))
401.         afr(0) # Modelo C
402.         print("{}".format(sb))
403.         spc = len(chunk.point_cloud.points)
404.         sigma = float(chunk.meta['optimize/sigma0'])
405.         print("{} - {} ({:.1f}%) = {}\nSigma0: {:.6f} -
> {:.6f}\n{}\n"
406.               "\n".format(spcN, pselN, percN, spc, sigmaN, si
gma, sb))
407.         else: # psel !=0 e perc > 50
408.             print("> 50% de pts selecionados: sem filtragem!")
409.             break # quebra loop
410.         spc1 = len(chunk.point_cloud.points) # no. pts final
411.         sigma1 = float(chunk.meta['optimize/sigma0']) # sigma0 final
412.         print("Sigma0: {:.6f} -> {:.6f}\nTiepoints: {} -
> {}\n{}\n"
413.               "".format(sigma0, sigma1, spc0, spc1, sb))
414.
415.     def getVPD(path): # função: calcular VPD
416.         with open(path, "rt") as f:
417.             for line in f:
418.                 if line.startswith("#") or line.startswith("\n"):
419.                     continue
420.                 else:
421.                     split = line.rsplit(",", 6)
422.                     SH = float(split[0]) # altura do sensor (mm)
423.                     FR = float(split[1]) # distância focal (mm)
424.                     IH = int(split[2]) # altura da imagem (pix)
425.                     ST = float(split[3]) # t leitura sensor (ms)
426.                     FH = int(split[4]) # altura do voo (m)
427.                     VE = float(split[5]) # velocidade (m/s)
428.                     VPD = round((ST / 1000) * (VE / FH) * (FR * (IH / SH)), 2)
429.                     if VPD > 2: return True, VPD
430.                     else: return False, VPD
431.
432.     def workflow(): # função: fluxo de trabalho
433.         global doc # doc = variável global
434.         global chunk # chunk = variável global
435.         app = PS.app # aplicação Metashape
436.         doc = app.document # documento atual no PS
437.         chunk = doc.chunk # bloco atual no PS
438.         time_datetime = datetime.now() # data/hora nome do arquivo
439.         prjrun = time_datetime.strftime('%Y%m%d-%H%M') # data/hora
440.         lb, sb = (70 * "-", 50 * "-")
441.
442.         print("\nConfigurações iniciais...\n{}\n".format(lb))
443.         try: # ---- Início da configuração pelo usuário ---- #
444.             path_ph = app.getExistingDirectory("Pasta FOTOGRAFIAS:")
445.             path_ph += "/"
446.             # definição do nome do projeto e caminhos
447.             path_proj = app.getSaveFileName("Salvar projeto como...")
448.             path_proj += "_" + prjrun + ".psx"
449.             # arquivo 01: selecionar arquivo de calibração da câmera
450.             pathLen = app.getOpenFileName("Calibração:", "*.xml")
451.             # arquivo 02: selecionar arquivo sensor / parâmetros voo
452.             pathVpd = app.getOpenFileName("Sensor e voo:", "*.txt")
453.             # arquivo 03: arquivo pts de apoio
454.             path_mrkr = app.getOpenFileName("Pontos apoio:", "*.txt")
455.             # arquivo 04: arquivo de coordenadas 2D alvos nas imagens
456.             path_2dc = app.getOpenFileName("Coordenadas alvos:", "*.t
xt")
457.             # definição sistema coordenadas do projeto (base GCP)
458.             n_crs = app.getCoordinateSystem("Sistema Coord. GCPs:")
459.             except Exception:
460.                 print("Erro: não foi possível configurar entrada!\n")
461.             try: # -- Automático: organização diretórios de saída -- #
462.                 path_export = path_ph + "/Saida" # define pasta Saida
463.                 if not os.path.exists(path_export): # se "Saida" existe
464.                     os.makedirs(path_export) # se não: cria pasta Saida
465.                 path_pdf = path_export + "/0_Relatorios_PDF"
466.                 if not os.path.exists(path_pdf):
467.                     os.makedirs(path_pdf)
468.                 path_pc = path_export + "/1_Nuvem_pontos_LAZ"
469.                 if not os.path.exists(path_pc):
470.                     os.makedirs(path_pc)
471.                 path_err = path_export + "/2_Residuais_TXT"
472.                 if not os.path.exists(path_err):
473.                     os.makedirs(path_err)
474.             except Exception:

```

```

475.         print("Erro: não foi possível setar diretório saída!\n")
476.
477.     # ---- caminho de diretórios e outros arquivos ---- #
478.     path_report = path_pdf # Relatórios PDF
479.     path_report += "/relatorio_pdf_metashape_{_}".format(prjrun)
480.     path_tiep = path_pc # Nuvem de pts esparsa (SPC)
481.     path_tiep += "/pontos_nuvemesparsa_{_}.laz".format(prjrun)
482.     path_dense = path_pc # Nuvem de pts densa (DPC)
483.     path_dense += "/pontos_nuvmmdensa_{_}.laz".format(prjrun)
484.     path_cons = path_export # Log (console panel)
485.     path_cons += "/log_logconsolepanel_{_}.txt".format(prjrun)
486.     doc.save(path_proj) # Salvar projeto
487.     # ---- Parâmetros de entrada com valores padrão ---- #
488.     imgq = app.getFloat(label="Nitidez imagens", value=0.7)
489.     accu = PS.HighAccuracy # precisão de alinhamento
490.     keyp = app.getInt(label="Limite Feições", value=40000)
491.     tiep = app.getInt(label="Limite Pts Homólogos", value=4000)
492.     keepk = True # armazena pontos chave (feições detectadas)
493.     msk = False # filtro de máscara
494.     fitt = False # ajuste adaptativo inicial modelo câmera
495.     n_accu = str(accu).split(".") # PS.Accuracy.XXXXXXAccuracy
496.
497.     # 0. Início da rotina
498.     print("\n0. Início do processamento...\n").format(lb))
499.     print("1.Qualidade imagens: {}\n2.Acurácia alinhamento: {}\n"
500.           "3.Key points: {}\n4.Tie points: {}\n"
501.           "5.Máscara Filtro: {}\n6.Ajuste adapt. modelo câmera:"
502.           " {}{}\n".format(imgq, n_accu[-1], keyp, tiep,
503.                             msk, fitt, lb))
504.     doc.save()
505.
506.     # 1. Criar novo bloco de processamento
507.     print("\n1. Bloco de processamento...\n").format(lb))
508.     if doc.chunk:
509.         print("Bloco já existente...")
510.         if not chunk.cameras:
511.             print("... e está vazio! Usará último bloco vazio.")
512.             chunk = doc.chunks[-1] # foca no último bloco
513.         elif chunk.cameras:
514.             print("... e contém fotos! Será criado novo bloco.")
515.             chunk_idx_name = len(doc.chunks) + 1
516.             doc.addChunk() # adiciona bloco ao espaço trabalho
517.             chunk = doc.chunks[-1] # último bloco (criado)
518.             chunk.label = "Bloco " + str(chunk_idx_name)
519.             print(chunk.label, "criado com sucesso!")
520.
521.     # 2. Carregar fotografia aérea no bloco
522.     print("\n2. Imagens aéreas no bloco\n").format(lb))
523.     img_list = [os.path.join(path_ph, path) # 2.1 Lista imagens
524.                 for path in os.listdir(path_ph)
525.                 if path.lower().endswith(("jpg", "jpeg", "tif",
526.                                           "tiff", "png", "dng"))]
527.     n_ph = len(img_list) # 2.2 conta número de imgs listadas
528.     chunk.addPhotos(img_list, strip_extensions=True) # 2.3 add
529.     print("{}\n{} imagens adicionadas!\n".format(lb, n_ph))
530.     doc.save()
531.
532.     # 3. Conversão do Sistema de Coordenadas
533.     print("\n3. Sistema de Coordenadas\n").format(lb))
534.     crs = chunk.crs # sistema de coordenadas atual
535.     print("Sistema Coordenadas Antigo:\n {}".format(crs))
536.     print("\nSistema Coordenadas Novo:\n {}".format(n_crs))
537.     for camera in chunk.cameras: # 3.1 conversão coord imgs
538.         if camera.reference.location:
539.             cs = PS.CoordinateSystem
540.             cr = camera.reference
541.             cr.location = cs.transform(camera.reference.location,
542.                                       chunk.crs, n_crs)
543.     doc.chunk.crs = n_crs # 3.2 conversão coord do bloco
544.     doc.save()
545.
546.     # 4. Estimativa da nitidez das imagens
547.     print("\n4. Qualidade das Imagens\n").format(lb))
548.     cameras = chunk.cameras # lista de imagens no bloco
549.     if len(cameras) > 0: # se tem fotos!
550.         chunk.estimateImageQuality(cameras) # estima qualidade
551.     # 4.1 desabilita imagens com valor menor que o estabelecido
552.     for camera in cameras:
553.         if float(camera.meta['Image/Quality']) < imgq:
554.             camera.enabled = False
555.     # 4.2 imprime relatório no console
556.     width = 20
557.     qwidth = 10
558.     print("\n Relatório de Nitidez\n").format(sb))
559.     print("Imagem".ljust(width), "Qualidade".ljust(qwidth),
560.           "Habilitado?".ljust(qwidth))

```



```

561.     [print(str(camera.label).ljust(width),
562.           str(camera.meta["Image/Quality"]).ljust(qwidth),
563.           "+" if camera.enabled is True else "-")
564.           for camera in cameras]
565.     print("{}\n".format(sb))
566.     doc.save()
567.
568.     # 5. Calibração da câmera
569.     print("\n5. Calibração prévia da câmera...\n{}\n".format(lb))
570.     # carrega o Arquivo 01 de calibração da câmera
571.     if not pathLen == "": # funciona apenas se arquivo entrada
572.         sensor = chunk.sensors[0] # foca 1o grupo sensores bloco
573.         # Com diferentes sensores, alterar acima diretamente
574.         print("Calibração carregada sensor: ", chunk.sensors[0])
575.         # Caso não tenha, designar largura/altura p/ sensor antes
576.         # de carregar arquivo calibração. Usa 1a img na estimativa
577.         if not sensor.width and sensor.height:
578.             sensor.width = chunk.cameras[0].photo.image().width
579.             sensor.height = chunk.cameras[0].photo.image().height
580.         else:
581.             print("Já possui altura largura: carregar calib!")
582.             try:
583.                 calib = PS.Calibration()
584.                 calib.load(pathLen, format="xml")
585.                 print("Arquivo de calibração carregado!\n")
586.             except OSError:
587.                 print("Não há arquivo especificado!\n")
588.             sensor.user_calib = calib # ajustar Tab calib inicial
589.             sensor.fixed = False # refinamento autocalibração
590.         else:
591.             print("Não há arquivo de calibração de câmera!\n")
592.     doc.save()
593.
594.     # 6. Compensação do efeito do obturador de varredura
595.     print("\n6. Rolling shutter...\n{}\n".format(lb))
596.     if not pathVpd == "": # apenas com arquivo de entrada
597.         t, VPD = getVPD(pathVpd) # calcula VPD Arquivo 02
598.         if t is True: # se True (> 2)
599.             print("VPD = {}".format(VPD))
600.             for sensor in chunk.sensors:
601.                 sensor.rolling_shutter = True
602.             print("Sensor: {}\nCompensação: {}\n"
603.                   "".format(sensor.label, sensor.rolling_shutter))
604.         else: # se False (< 2)
605.             print("VPD = {}\nSem compensação!\n".format(VPD))
606.         else:
607.             print("Não há arquivo de parâmetros de sensor e voo!\n")
608.     doc.save()
609.
610.     # 7. Reconstrução 3D: detecção feições, pts homólogos, IO/EO
611.     print("\n7. Reconstrução 3D...\n{}\n".format(lb))
612.     for camera in chunk.cameras: # 7.1 imgs georreferenciadas?
613.         pmeta = camera.photo.meta
614.         if pmeta["Exif/GPSLatitude"] and pmeta["Exif/GPSLongitude"]:
615.             if pmeta["Exif/GPSAltitude"]:
616.                 gnrrpslc = True # diminui tempo processamento
617.                 refpslc = True # usa geotags das imgs
618.             else:
619.                 gnrrpslc = True
620.                 refpslc = False
621.         else: # sem metadados EXIF: só Generic Preselection
622.             gnrrpslc = True
623.             refpslc = False
624.     # 7.2 detecção de pts pelo Limite de Feições, seleciona
625.     # pares ao identificar, combinar e filtrar pts homólogos.
626.     chunk.matchPhotos(accuracy=accu, generic_preselection=gnrrpslc,
627.                      reference_preselection=refpslc,
628.                      filter_mask=msk, keypoint_limit=keyp,
629.                      tiepoint_limit=tiep, keep_keypoints=keepk)
630.     # 7.3. alinhamento das câmeras(OE+OI), ajuste adapt. modelo
631.     # da câmera previne a divergência de POI por estimá-los
632.     # com base em níveis de consistência estatística.
633.     chunk.alignCameras(adaptive_fitting=fitt)
634.     getPDFreport(path_report) # gera relatório PDF [1]
635.     getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [1]
636.     doc.save()
637.
638.     # 8. Mudança de referência do bloco
639.     print("\n8. Mudança de referência do bloco\n{}\n".format(lb))
640.     open_markers(path_mrkr, 0) # 8.1 cria pts apoio Arquivo 03
641.     open_markers(path_mrkr, 1) # 8.2 ref pts apoio Arquivo 03
642.     open_proj_markers(path_2dc) # 8.3 coord 2D ptos Arquivo 04
643.     chunk.updateTransform() # 8.12 aproxima nuvem pts controle
644.     getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [1]
645.     if chunk.markers: # 8.13 desabilitar referência coord imgs

```

```

646.         print("Adotando referência dos pontos controle!\n")
647.         for camera in chunk.cameras:
648.             camera.reference.enabled = False
649.         else:
650.             print("Não há pontos de apoio carregados no bloco!")
651.             check_iscontrol(path_mrkr) # 8.4 controle/verif Arquivo 03
652.             chunk.updateTransform() # 8.5 aprox nuvem dos pts controle
653.             getPDFReport(path_report) # gera relatório PDF [2]
654.             getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [2]
655.             getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [2]
656.             allMarkers() # todos os pts de apoio
657.             afr(0) # 8.11 AFR pts apoio todos c/ coord 3D
658.             check_iscontrol(path_mrkr) # 8.4 controle/verif Arquivo 03
659.             chunk.updateTransform() # 8.5 aprox nuvem dos pts controle
660.             getPDFReport(path_report) # gera relatório PDF [3]
661.             getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [3]
662.             getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [3]
663.             doc.save()
664.
665.             # 9. Filtragem SPC: ferramenta de seleção gradual
666.             print("\n10. Filtragem: Nuvem Pontos Esparsa\n{}".format(lb))
667.             # 9.1 limiares de filtragem
668.             fRecUnStart, fRecUnStop = (40, 20) # incerteza reconstrução
669.             fProjAccStart, fProjAccStop = (10, 6) # acurácia de projeção
670.             fRepErrorStart, fRepErrorStop = (0.5, 0.3) # erro reprojeção
671.             fImgCountStart, fImgCountStop = (2, 3) # contagem de imagem
672.             print("1.Incerteza Reconstrução: {}-
673.                 {}-{}\n3.Erro Reprojeção: {}-{}\n4.Contagem imagem:"
674.                 " {}-{}\n{}\n"
675.                 "".format(fRecUnStart, fRecUnStop, fProjAccStart,
676.                           fProjAccStop, fRepErrorStart, fRepErrorStop,
677.                           fImgCountStart, fImgCountStop, lb))
678.             # 9.2 filtro: interteza da reconstrução
679.             allMarkers() # todos os pts de apoio
680.             fRecUn_noloop(fRecUnStart, fRecUnStop, 1)
681.             check_iscontrol(path_mrkr) # pts controle/verificação
682.             chunk.updateTransform() # transformação linear modelo
683.             getPDFReport(path_report) # gera relatório PDF [4]
684.             getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [4]
685.             getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [4]
686.             # 9.3 filtro: acurácia da projeção
687.             allMarkers() # todos os pts de apoio
688.             fProjAcc_noloop(fProjAccStart, fProjAccStop, 1)
689.             check_iscontrol(path_mrkr) # pts controle/verificação
690.             chunk.updateTransform() # transformação linear modelo
691.             getPDFReport(path_report) # gera relatório PDF [5]
692.             getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [5]
693.             getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [5]
694.             # 9.4 filtro: erro de reprojeção
695.             allMarkers() # todos os pts de apoio
696.             fRepError_loop(fRepErrorStart, fRepErrorStop, 0)
697.             check_iscontrol(path_mrkr) # pts controle/verificação
698.             chunk.updateTransform() # transformação linear modelo
699.             getPDFReport(path_report) # gera relatório PDF [6]
700.             getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [6]
701.             getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [6]
702.             # 9.5 filtro: contagem de imagem
703.             allMarkers() # todos os pts de apoio
704.             fImgCount_noloop(fImgCountStart, fImgCountStop, 0)
705.             check_iscontrol(path_mrkr) # pts controle/verificação
706.             chunk.updateTransform() # transformação linear modelo
707.             getPDFReport(path_report) # gera relatório PDF [7]
708.             tieacc, mrkacc = (getResidualErrors(path_err), # reproj [7]
709.                              getMarkerErrors(path_err)) # pts apoio [7]
710.             doc.save()
711.
712.             # 10. Ajuste região processamento (bounding box)
713.             print("\n10. Ajuste do bounding box\n{}\n".format(lb))
714.             resBbox()
715.             doc.save()
716.
717.             # 11. AFR final com ajuste observações pontos (pesos)
718.             print("\n11. Ajustamento AFR Final\n{}\n".format(lb))
719.             print("Precisão Pontos Homólogos: {:.6f}\nPrecisão Pontos
720.                   " de Apoio: {:.6f}".format(tieacc, mrkacc))
721.             # definir pesos corretos p/ observações AFR (base nos erros)
722.             chunk.tiepoint_accuracy = tieacc
723.             chunk.marker_projection_accuracy = mrkacc
724.             allMarkers() # todos os pts de apoio
725.             afr(0) # AFR final
726.             print("Tempo: {}".format(chunk.meta['optimize/duration']))
727.             print("Params: {}".format(chunk.meta['optimize/fit_flags']))
728.             print("Sigma0: {}".format(chunk.meta['optimize/sigma0']))
729.             check_iscontrol(path_mrkr) # pts de controle/verificação
730.             chunk.updateTransform() # transformação linear modelo

```



```

731. getPDFreport(path_report) # gera relatório PDF [8]
732. getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [8]
733. doc.save()
734.
735. # 12 exporta nuvem de pts esparsa (LAZ)
736. chunk.exportPoints(path_tiep, source=PS.PointCloudData,
737.                     binary=True, precision=6, normals=True,
738.                     colors=True,
739.                     raster_transform=PS.RasterTransformNone,
740.                     format=PS.PointsFormatLAZ,
741.                     projection=chunk.crs)
742.
743. # 13. Geração da Nuvem Densa - Multiview Stereo (MVS)
744. print("\n12. Geração Nuvem Pontos Densa\n{}\n".format(1b))
745. # 13.1 Qualidade e filtragem
746. qual = PS.UltraQuality # UltraQuality = imgs originais
747. filt = PS.MildFiltering # MildFiltering = preserva detalhe
748. app.gpu_mask = 1 # [1] usar GPU; [0] não usar GPU
749. app.cpu_enable = False # não usar CPU com GPU ativa
750. # 13.2 mapas de profundidade por imagem
751. chunk.buildDepthMaps(quality=qual, filter=filt, reuse_depth=False)
752. # 13.3 nuvem pts densa do bloco de processamento
753. chunk.buildDenseCloud(point_colors=True, keep_depth=True)
754. doc.save()
755. # 13.4 exporta nuvem de pts densa (LAZ)
756. chunk.exportPoints(path_dense, source=PS.DenseCloudData,
757.                     binary=True, precision=6, normals=True,
758.                     colors=True,
759.                     raster_transform=PS.RasterTransformNone,
760.                     format=PS.PointsFormatLAZ,
761.                     projection=chunk.crs)
762. getPDFreport(path_report) # gera relatório PDF [9]
763. getResidualErrors(path_err) # erros reprojeção [9]
764. getMarkerErrors(path_err) # residual pts apoio [9]
765. doc.save()
766.
767. # 14. Salva log em arquivo de txt
768. exportCons(path_cons, app.ConsolePane().contents)
769.
770. 1b10 = "Automático/Inicia processamento..."
771. PS.app.addMenuItem(1b10, workflow)
772. print("\nPara executar: Menu > Automático {}\n".format(1b10))
773.
774. """Fontes/referências:
775. Agisoft, 2019, Metashape Python Reference 1.5.1, Fev 2019,175p
776. <www.agisoft.com/pdf/metashape_python_api_1_5_1.pdf>
777. Agisoft Community Forum, 2019:
778. www.agisoft.com/forum/index.php?topic=7459, acesso: Dez 2017
779. www.agisoft.com/forum/index.php?topic=8058, acesso: Jan 2018
780. www.agisoft.com/forum/index.php?topic=7851, acesso: Jan 2018
781. www.agisoft.com/forum/index.php?topic=5536, acesso: Jan 2018
782. www.agisoft.com/forum/index.php?topic=7543, acesso: Set 2019"
783. """

```

Agisoft Metashape

Processing Report
05 December 2019

Survey Data

Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	155	Camera stations:	152
Flying altitude:	68 m	Tie points:	310,965
Ground resolution:	2.62 cm/pix	Projections:	756,526
Coverage area:	0.0919 km ²	Reprojection error:	0.352 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC330 (3.61mm)	3992 x 2992	3.61 mm	1.57 x 1.57 μ m	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

Fig. 2. Image residuals for FC330 (3.61mm).

FC330 (3.61mm)

155 images, rolling shutter, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	3992 x 2992	3.61 mm	1.57 x 1.57 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2309.18	0.24	1.00	-0.33	-0.09	-0.57	-0.42	-0.67	0.62	-0.25	0.06	0.02
Cx	5.2431	0.021		1.00	0.03	0.09	0.14	0.21	-0.18	0.03	0.51	-0.06
Cy	-15.3978	0.02			1.00	0.06	0.02	0.06	-0.06	0.04	-0.10	0.43
B1	6.27143	0.064				1.00	0.37	0.35	-0.29	0.14	-0.06	0.01
B2	1.55626	0.063					1.00	0.33	-0.26	0.11	-0.05	0.00
K1	-0.126167	3.7e-005						1.00	-0.95	0.79	-0.04	-0.04
K2	0.105056	6.6e-005							1.00	-0.90	0.05	0.03
K3	-0.0141692	3.4e-005								1.00	-0.04	-0.01
P1	-0.000134503	2.6e-006									1.00	-0.15
P2	3.26405e-005	3.1e-006										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

Fig. 3. GCP locations and error estimates.

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

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	0.342923	0.566197	0.599068	0.661948	0.892781

Table 3. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
2	0.21965	0.301243	2.05017	0.372819	2.08379

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

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
perus1_113	0.581874	0.696086	-0.913191	1.28726	0.175 (17)
perus1_114	-0.134991	0.199938	0.0692879	0.250995	0.175 (10)
perus1_115	-0.470767	-1.03679	0.833864	1.41134	0.239 (10)
perus1_117	-0.0652451	0.0254748	-0.509756	0.514545	0.146 (4)
perus1_134	0.0728233	0.0528479	-0.0227167	0.0928019	0.236 (13)
Total	0.342923	0.566197	0.599068	0.892781	0.202

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

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
perus1_116	0.307553	0.326605	-1.2083	1.2889	0.247 (12)
perus1_139	0.0436308	-0.27354	-2.6356	2.65012	0.127 (13)
Total	0.21965	0.301243	2.05017	2.08379	0.194

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

Processing Parameters

General

Cameras	155
Aligned cameras	152
Markers	7
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	310,965 of 445,434
RMS reprojection error	0.101065 (0.35166 pix)
Max reprojection error	0.307964 (4.5215 pix)
Mean key point size	3.26509 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	Yes
Average tie point multiplicity	2.47171

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	120,000
Tie point limit	0
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	2 minutes 59 seconds
Alignment time	2 minutes 37 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	4 seconds

Depth Maps

Count	152
Reconstruction parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild
Processing time	28 minutes 22 seconds

Dense Point Cloud

Points	282,626,750
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	Ultra High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	28 minutes 22 seconds
Dense cloud generation time	1 hours 42 minutes

Software

Version	1.5.1 build 7618
Platform	Windows 64

Perus 2019

Processing Report
05 December 2019

Survey Data

Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	484	Camera stations:	462
Flying altitude:	95.6 m	Tie points:	542,466
Ground resolution:	2.29 cm/pix	Projections:	1,344,159
Coverage area:	0.259 km ²	Reprojection error:	0.382 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

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

FC6310 (8.8mm)

484 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm
F:	3659.23		
Cx:	-11.0905	B1:	0
Cy:	15.4206	B2:	0
K1:	0.00484946	P1:	-0.000721659
K2:	-0.0146781	P2:	-0.00036759
K3:	0.013829	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Ground Control Points

Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	3.21243	1.56634	2.25719	3.57396	4.22706

Table 2. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
3	1.21368	2.05002	4.155	2.38235	4.78953

Table 3. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
perus3_01	1.43154	-2.23295	-3.32823	4.25588	0.315 (19)
perus3_04	6.04872	1.55682	2.33232	6.66712	0.290 (23)
perus3_05	-3.59824	-0.765557	-1.27921	3.89484	0.304 (24)
perus4_01	0.0282225	1.82859	-2.22147	2.8774	0.239 (24)
perus4_04	-0.119016	-0.963097	1.54476	1.82428	0.291 (4)
Total	3.21243	1.56634	2.25719	4.22706	0.287

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

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
perus3_02	1.55423	3.48481	-0.364185	3.83304	0.307 (17)
perus4_02	-1.41464	-0.0346659	-6.23263	6.39125	0.168 (8)
perus4_03	-0.0472265	-0.680134	-3.57962	3.64397	0.234 (10)
Total	1.21368	2.05002	4.155	4.78953	0.260

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

Processing Parameters

General	
Cameras	484
Aligned cameras	462
Markers	8
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG::31983)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	542,466 of 999,197
RMS reprojection error	0.124462 (0.381502 pix)
Max reprojection error	0.362819 (2.62563 pix)
Mean key point size	2.99861 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	4.343 GB
Average tie point multiplicity	2.64211
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	120,000
Tie point limit	0
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	7 minutes 20 seconds
Alignment time	5 minutes 19 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	6 seconds
Depth Maps	
Count	461
Depth maps generation parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild
Processing time	1 hours 23 minutes
Software version	1.5.2.7838
Dense Point Cloud	
Points	1,205,576,841
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild
Processing time	1 hours 23 minutes
Dense cloud generation parameters	
Processing time	5 hours 3 minutes
Software version	1.5.2.7838
Software	
Version	1.5.2 build 7838
Platform	Windows 64

ANEXO C – Relatórios dos processamentos GNSS de 2017 (exceto os residuais).

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:	0_Perus_1_correcao_base_ef.vce	Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:	71 KB	Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	16/06/2019 10:05:14 (UTC:-3)	Zona:	UTM zone 23S
Fuso horário:	Hora oficial do Brasil	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015

Relatório de processamento das linhas de base (BASE 2017)

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo solução	Prec. H (m)	Prec. V (m)	Az. geodésico	Dist. elip. (m)	ΔAltura (m)
POLI --- BP1 (B1)	POLI	BP1	Fixo	0,008	0,035	328°45'38"	13150,626	295,400
SPC1 --- BP1 (B6)	SPC1	BP1	Fixo	0,024	0,081	158°59'15"	75694,478	403,064

Resumo da aceitação

Data Processamento	Passado		Falha
2	2	0	0

POLI - BP1 (11:17:21-14:49:49) (S1)

Observação de linha de base:	POLI --- BP1 (B1)
Data do Processamento:	16/06/2019 09:59:01
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,008 m
Precisão vertical:	0,035 m
RMS:	0,032 m
PDOP Máximo:	2,057
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	11/10/2017 11:17:27 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	11/10/2017 14:49:42 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	03:32:15
Intervalo de processamento:	15 segundos

Componentes do vetor (marca a marca)

De:		POLI				
Grid		Local		Global		
Direção leste	323390,708 m	Latitude	S23°33'20,33228"	Latitude	S23°33'20,33228"	
Direção norte	7393902,043m	Longitude	O46°43'49,12319"	Longitude	O46°43'49,12319"	
Elevação	733,670 m	Altura	730,622 m	Altura	730,622 m	
Para:		BP1				
Grid		Local		Global		
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"	
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"	
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m	
Vetor						
Δ Direção leste	-6955,081 m	Azimute avanço NS		328°45'38"	ΔX	-1709,216 m
Δ Direção norte	11160,916 m	Distância do elip.		13150,626 m	ΔY	-8135,972 m
Δ Elevação	295,384 m	Δ Altura		295,400 m	ΔZ	10196,004 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,003 m	σ Azimuth avanço NS	0°00'00"	σ ΔX	0,011 m
σ Δ Norte	0,003 m	σ Dist. elipsoide	0,003 m	σ ΔY	0,012 m
σ Δ Elevação	0,018 m	σ ΔAltura	0,018 m	σ ΔZ	0,008 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0001306340		
y	-0,0001264170	0,0001395981	

Z	-0,0000820594	0,0000857426	0,0000664137
----------	---------------	--------------	--------------

Ocupações

	De	Para
ID ponto:	POLI	BP1
Arquivo dados:	poli2841.17o	Q0224B17.284
Tipo receptor:	NetR9	SP60
Número série receptor:	5552R50037	5722550224
Tipo de antena:	Zephyr Geodetic 2 RoHS	SP60
Número série antena:	2612117453	5722550224
Altura da antena:	0,050 m	1,680 m
Método medição ant.:	Base da montagem da antena	Marca de medição de inclinação

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:	2_Perus_1_correcao.vce	Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:	67 KB	Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	16/06/2019 10:19:26 (UTC:-3)	Zona:	UTM zone 23S
Fuso horário:	Hora oficial do Brasil	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015

Relatório de processamento das linhas de base (PONTOS APOIO 2017)

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo sol.	Prec. H (m)	Prec. V (m)	Az. Geod.	Dist. elip (m)	ΔAltura (m)
BP1 --- p1_134 (B2)	BP1	p1_134	Fixo	0,005	0,008	104°38'32"	53,394	-6,968
BP1 --- p1_139 (B3)	BP1	p1_139	Fixo	0,005	0,009	125°17'00"	103,547	-12,659
BP1 --- p1_117 (B4)	BP1	p1_117	Fixo	0,004	0,009	127°00'59"	155,157	-11,827
BP1 --- p1_116 (B5)	BP1	p1_116	Fixo	0,007	0,009	91°32'07"	189,922	-91,100
BP1 --- p1_115 (B6)	BP1	p1_115	Fixo	0,005	0,006	88°45'26"	209,147	-98,780
BP1 --- p1_114 (B7)	BP1	p1_114	Fixo	0,006	0,007	97°52'55"	241,706	-88,994
BP1 --- p1_113 (B8)	BP1	p1_113	Fixo	0,005	0,007	86°01'41"	254,344	-110,574

Resumo da aceitação

Data Processamento	Passado		Falha
7	7	0	0

BP1 - p1_134 (11:36:49-11:42:02) (S2)

Observação de linha de base:	BP1 --- p1_134 (B2)
Data do Processamento:	16/06/2019 10:17:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,005 m
Precisão vertical:	0,008 m
RMS:	0,016 m
PDOP Máximo:	1,930
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	11/10/2017 11:36:49 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	11/10/2017 11:42:02 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:05:13
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP1					
	Grid		Local		Global
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m
Para: p1_134					
	Grid		Local		Global
Direção leste	316487,452 m	Latitude	S23°27'15,23341"	Latitude	S23°27'15,23340"
Direção norte	7405050,107m	Longitude	O46°47'47,59734"	Longitude	O46°47'47,59734"
Elevação	1022,086 m	Altura	1019,054 m	Altura	1019,054 m
Vetor					
Δ Direção leste	51,826 m	Azimute avanço NS	104°38'32"	ΔX	29,608 m
Δ Direção norte	-12,851 m	Distância do elip.	53,394 m	ΔY	43,948 m
Δ Elevação	-6,968 m	Δ Altura	-6,968 m	ΔZ	-9,611 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'07"	σ ΔX	0,003 m

$\sigma \Delta$ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	$\sigma \Delta Y$	0,003 m
$\sigma \Delta$ Elevação	0,004 m	$\sigma \Delta$ Altura	0,004 m	$\sigma \Delta Z$	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000113801		
y	-0,0000062814	0,0000087700	
Z	-0,0000024791	0,0000017037	0,0000034202

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_134
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228A17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número série receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número série antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena:	1,680 m	2,000 m
Método medição antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP1 - p1_139 (12:08:04-12:11:23) (S3)

Observação de linha de base:	BP1 --- p1_139 (B3)
Data do Processamento:	16/06/2019 10:17:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,005 m
Precisão vertical:	0,009 m
RMS:	0,009 m
PDOP Máximo:	1,946
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	11/10/2017 12:08:04 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	11/10/2017 12:11:23 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:03:19
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP1					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m
Para: p1_139					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316520,895 m	Latitude	S23°27'16,73885"	Latitude	S23°27'16,73885"
Direção norte	7405004,207m	Longitude	O46°47'46,43936"	Longitude	O46°47'46,43936"
Elevação	1016,395 m	Altura	1013,363 m	Altura	1013,363 m
Vetor					
Δ Direção leste	85,268 m	Azimute avanço NS	125°17'00"	ΔX	37,374 m
Δ Direção norte	-58,752 m	Distância do elip.	103,547 m	ΔY	83,696 m
Δ Elevação	-12,659 m	Δ Altura	-12,659 m	ΔZ	-49,839 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
$\sigma \Delta$ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'03"	$\sigma \Delta X$	0,003 m
$\sigma \Delta$ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	$\sigma \Delta Y$	0,003 m
$\sigma \Delta$ Elevação	0,004 m	$\sigma \Delta$ Altura	0,004 m	$\sigma \Delta Z$	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000115842		
y	-0,0000074664	0,0000106871	
Z	-0,0000037585	0,0000032435	0,0000038516

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_139
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228B17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número série receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número série antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,680 m	2,000 m
Método medição antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP1 - p1_117 (12:25:02-12:28:25) (S4)

Observação de linha de base:	BP1 --- p1_117 (B4)
Data do Processamento:	16/06/2019 10:17:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,004 m
Precisão vertical:	0,009 m
RMS:	0,010 m
PDOP Máximo:	1,779
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	11/10/2017 12:25:02 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	11/10/2017 12:28:25 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:03:23
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	BP1				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m
Para:	p1_117				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316560,673 m	Latitude	S23°27'17,83104"	Latitude	S23°27'17,83104"
Direção norte	7404971,100m	Longitude	O46°47'45,05252"	Longitude	O46°47'45,05252"
Elevação	1017,227 m	Altura	1014,195 m	Altura	1014,195 m
Vetor					
Δ Direção leste	125,046 m	Azimute avanço NS	127°00'59"	ΔX	57,435 m
Δ Direção norte	-91,858 m	Distância do elip.	155,157 m	ΔY	119,840 m
Δ Elevação	-11,828 m	Δ Altura	-11,827 m	ΔZ	-80,999 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'02"	σ ΔX	0,003 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,004 m
σ Δ Elevação	0,005 m	σ ΔAltura	0,005 m	σ ΔZ	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000109875		
y	-0,0000088429	0,0000131187	
Z	-0,0000046695	0,0000050796	0,0000049221

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_117
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228C17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número série receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número série antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena:	1,680 m	2,000 m

Método medição antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena
-------------------------------	--------------------------------	----------------------------

BP1 - p1_116 (13:39:19-13:42:52) (S5)

Observação de linha de base:	BP1 --- p1_116 (B5)
Data do Processamento:	16/06/2019 10:17:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,007 m
Precisão vertical:	0,009 m
RMS:	0,015 m
PDOP Máximo:	1,580
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	11/10/2017 13:39:19 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	11/10/2017 13:42:52 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:03:33
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP1					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m
Para: p1_116					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316625,532 m	Latitude	S23°27'14,96004"	Latitude	S23°27'14,96003"
Direção norte	7405060,241m	Longitude	O46°47'42,72835"	Longitude	O46°47'42,72835"
Elevação	937,953 m	Altura	934,922 m	Altura	934,922 m
Vetor					
Δ Direção leste	189,905 m	Azimute avanço NS	91°32'07"	ΔX	79,810 m
Δ Direção norte	-2,717 m	Distância do elip.	189,922 m	ΔY	192,388 m
Δ Elevação	-91,101 m	Δ Altura	-91,100 m	ΔZ	31,592 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'03"	σ ΔX	0,003 m
σ Δ Norte	0,003 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,003 m
σ Δ Elevação	0,005 m	σ Δ Altura	0,005 m	σ ΔZ	0,004 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000119180		
y	-0,0000064244	0,0000104909	
Z	-0,0000056301	0,0000046840	0,0000133426

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_116
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228D17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número série receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número série antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,680 m	2,000 m
Método medição antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP1 - p1_115 (13:47:40-13:50:55) (S6)

Observação de linha de base:	BP1 --- p1_115 (B6)
Data do Processamento:	16/06/2019 10:17:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)

Precisão horizontal: 0,005 m
 Precisão vertical: 0,006 m
 RMS: 0,010 m
 PDOP Máximo: 1,426
 Efeméride usada: Preciso
 Modelo da antena: NGS Absolute
 Hora de início do processamento: 11/10/2017 13:47:40 (Local: UTC -3hr)
 Hora de fim do processamento: 11/10/2017 13:50:55 (Local: UTC -3hr)
 Duração do processamento: 00:03:15
 Intervalo de processamento: 1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	BP1				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m
Para:	p1_115				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316644,655 m	Latitude	S23°27'14,64718"	Latitude	S23°27'14,64718"
Direção norte	7405070,106m	Longitude	O46°47'42,05031"	Longitude	O46°47'42,05031"
Elevação	930,273 m	Altura	927,242 m	Altura	927,242 m
Vetor					
Δ Direção leste	209,029 m	Azimute avanço NS	88°45'26"	ΔX	91,639 m
Δ Direção norte	7,147 m	Distância do elip.	209,147 m	ΔY	207,907 m
Δ Elevação	-98,781 m	Δ Altura	-98,780 m	ΔZ	43,479 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'02"	σ ΔX	0,002 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,002 m
σ Δ Elevação	0,003 m	σ Δ Altura	0,003 m	σ ΔZ	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000054931		
y	-0,0000026866	0,0000049933	
Z	-0,0000017992	0,0000015623	0,0000057542

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_115
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228E17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número série antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,680 m	2,000 m
Método medição antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP1 - p1_114 (14:11:21-14:14:32) (S7)

Observação de linha de base: BP1 --- p1_114 (B7)
 Data do Processamento: 16/06/2019 10:17:10
 Tipo de solução: Fixo
 Frequência usada: Frequência dupla (L1, L2)
 Precisão horizontal: 0,006 m
 Precisão vertical: 0,007 m
 RMS: 0,013 m
 PDOP Máximo: 1,632
 Efeméride usada: Preciso
 Modelo da antena: NGS Absolute
 Hora de início do processamento: 11/10/2017 14:11:21 (Local: UTC -3hr)
 Hora de fim do processamento: 11/10/2017 14:14:32 (Local: UTC -3hr)
 Duração do processamento: 00:03:11

Intervalo de processamento: 1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP1					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m
Para: p1_114					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316675,448 m	Latitude	S23°27'15,87203"	Latitude	S23°27'15,87203"
Direção norte	7405032,805m	Longitude	O46°47'40,98188"	Longitude	O46°47'40,98188"
Elevação	940,059 m	Altura	937,028 m	Altura	937,028 m
Vetor					
ΔDireção leste	239,821 m	Azimute avanço NS	97°52'55"	ΔX	109,623 m
ΔDireção norte	-30,154 m	Distância do elip.	241,706 m	ΔY	233,060 m
ΔElevação	-88,995 m	ΔAltura	-88,994 m	ΔZ	5,011 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'02"	σ ΔX	0,003 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,003 m
σ Δ Elevação	0,004 m	σ Δ Altura	0,004 m	σ ΔZ	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000092137		
y	-0,0000050072	0,0000072030	
Z	-0,0000015237	0,0000016544	0,0000055274

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_114
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228F17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número série receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número série antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,680 m	2,000 m
Método medição antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP1 - p1_113 (14:28:44-14:31:56) (S8)

Observação de linha de base:	BP1 --- p1_113 (B8)
Data do Processamento:	16/06/2019 10:17:10
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,005 m
Precisão vertical:	0,007 m
RMS:	0,010 m
PDOP Máximo:	1,503
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	11/10/2017 14:28:44 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	11/10/2017 14:31:56 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:03:12
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP1					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316435,627 m	Latitude	S23°27'14,79467"	Latitude	S23°27'14,79467"
Direção norte	7405062,959m	Longitude	O46°47'49,41750"	Longitude	O46°47'49,41750"
Elevação	1029,054 m	Altura	1026,022 m	Altura	1026,022 m

Para:	p1_113				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316689,124 m	Latitude	S23°27'14,22191"	Latitude	S23°27'14,22191"
Direção norte	7405083,744m	Longitude	O46°47'40,47768"	Longitude	O46°47'40,47768"
Elevação	918,479 m	Altura	915,448 m	Altura	915,448 m
Vetor					
Δ Direção leste	253,497 m	Azimute avanço NS	86°01'41"	ΔX	120,336 m
Δ Direção norte	20,786 m	Distância do elip.	254,344 m	ΔY	242,559 m
Δ Elevação	-110,575 m	Δ Altura	-110,574 m	ΔZ	60,177 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'01"	σ ΔX	0,003 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,003 m
σ Δ Elevação	0,004 m	σ Δ Altura	0,004 m	σ ΔZ	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000087680		
y	-0,0000048811	0,0000065816	
Z	-0,0000011560	0,0000014083	0,0000033221

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP1	p1_113
Arquivo de dados:	Q0224B17.284	Q0228G17.284
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,680 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

Estilo de processamento

Máscara de elevação:	10°00'00,0"
Processamento automático:	Sim
Iniciar numeração de ID automático:	AUTO0001
Vetores contínuos:	Não
Gerar resíduos:	Sim
Modelo da antena:	Automático
Tipo de efemérides:	Preciso
Frequência:	Várias frequências
Intervalo de processamento:	0,02 segundo
Forçar flutuação:	Não
Tipo de processamento de GIS:	Processamento de portadora e código automático

CrITÉRIOS de aceitação

Componente do vetor	Valor	Falha
Precisão horizontal >	0,020 m + 1,000 ppm	0,050 m + 1,000 ppm
Precisão vertical >	0,050 m + 1,000 ppm	0,100 m + 1,000 ppm

ANEXO D – Relatórios dos processamentos GNSS de 2019 (exceto os residuais).

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:	0_Perus_3_correcao_base_ef.vce	Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:	70 KB	Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	25/06/2019 10:59:16 (UTC:-3)	Zona:	UTM zone 23S
Fuso horário:	Hora oficial do Brasil	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015

Relatório de processamento das linhas de base (BASE BP2 2019)

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo solução	Prec. H (m)	Prec. V (m)	Az. geodésico	Dist. elip. (m)	ΔAltura (m)
POLI --- BP2 (B1)	POLI	BP2	Fixo	0,005	0,022	335°19'14"	14063,398	31,488
SPBP --- BP2 (B6)	SPBP	BP2	Fixo	0,011	0,038	204°24'58"	62620,255	-131,586
SPC1 --- BP2 (B3)	SPC1	BP2	Fixo	0,010	0,039	157°53'00"	74618,704	139,121

Resumo da aceitação

Data Processamento	Passado		Falha
3	3	0	0

POLI - BP2 (09:23:21-15:21:49) (S1)

Observação de linha de base:	POLI --- BP2 (B1)
Data do Processamento:	25/06/2019 10:55:00
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,005 m
Precisão vertical:	0,022 m
RMS:	0,019 m
PDOP Máximo:	2,264
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	05/06/2019 09:23:27 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	05/06/2019 15:21:42 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	05:58:15
Intervalo de processamento:	15 segundos

Componentes do vetor (marca a marca)

De:		POLI			
Grid		Local		Global	
Direção leste	323390,708 m	Latitude	S23°33'20,33228"	Latitude	S23°33'20,33228"
Direção norte	7393902,043m	Longitude	O46°43'49,12319"	Longitude	O46°43'49,12319"
Elevação	733,670 m	Altura	730,622 m	Altura	730,622 m
Para:		BP2			
Grid		Local		Global	
Direção leste	317365,196 m	Latitude	S23°26'24,91411"	Latitude	S23°26'24,91411"
Direção norte	7406609,199m	Longitude	O46°47'15,99224"	Longitude	O46°47'15,99224"
Elevação	765,133 m	Altura	762,110 m	Altura	762,110 m
Vetor					
Δ Direção leste	-6025,512 m	Azimute avanço NS	335°19'14"	ΔX	-765,275 m
Δ Direção norte	12707,156m	Distância do elip.	14063,398 m	ΔY	-7754,969 m
Δ Elevação	31,463 m	Δ Altura	31,488 m	ΔZ	11709,029 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimuth avanço NS	0°00'00"	σ ΔX	0,007 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,008 m
σ Δ Elevação	0,011 m	σ Δ Altura	0,011 m	σ ΔZ	0,005 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000493564		
y	-0,0000508236	0,0000595370	
Z	-0,0000305318	0,0000342648	0,0000238876

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	POLI	BP2
Arquivo de dados:	poli1561.19o	Q0224A13.293
Tipo do receptor:	NetR9	SP60
Número de série do receptor:	5552R50037	5722550224
Tipo de antena:	Zephyr Geodetic 2 RoHS	SP60
Número de série da antena:	2612117453	5722550224
Altura da antena (medida):	0,050 m	1,525 m
Método de medição da antena:	Base da montagem da antena	Marca de medição de inclinação

Dados do arquivo do projeto			Sistema de coordenadas		
Nome:	2_Perus_3_correcao.vce		Nome:	Brazil/SIRGAS2000	
Tamanho:	81 KB		Datum:	SIRGAS2000	
Modificado:	25/06/2019 11:36:12 (UTC:-3)		Zona:	UTM zone 23S	
Fuso horário:	Hora oficial do Brasil		Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015	

Relatório processamento das linhas de base (PONTOS APOIO – BP2/2019)

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo sol.	Prec. H (m)	Prec. V (m)	Az. Geod.	Dist. elip. (m)	ΔAltura (m)
BP2 --- p2_01 (B7)	BP2	p2_01	Fixo	0,012	0,041	210°09'55"	1471,047	87,472
BP2 --- p2_02 (B8)	BP2	p2_02	Fixo	0,014	0,039	202°02'05"	1464,683	80,931
BP2 --- p2_03 (B9)	BP2	p2_03	Fixo	0,017	0,031	200°46'51"	1535,983	86,303
BP2 --- p2_04 (B10)	BP2	p2_04	Fixo	0,012	0,025	201°04'20"	1542,219	86,874
BP2 --- p2_05 (B11)	BP2	p2_05	Fixo	0,016	0,025	199°29'25"	1545,630	84,589

Resumo da aceitação

Data Processamento	Passado		Falha
5	5	0	0

BP2 – p2_01 (09:58:29-10:24:43) (S7)

Observação de linha de base:	BP2 --- p2_01 (B7)
Data do Processamento:	25/06/2019 11:32:16
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,012 m
Precisão vertical:	0,041 m
RMS:	0,020 m
PDOP Máximo:	3,568
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	05/06/2019 09:58:29 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	05/06/2019 10:24:43 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:26:14
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP2					
Grid		Local		Global	
Direção leste	317365,196 m	Latitude	S23°26'24,91411"	Latitude	S23°26'24,91411"
Direção norte	7406609,199m	Longitude	O46°47'15,99224"	Longitude	O46°47'15,99224"
Elevação	765,133 m	Altura	762,110 m	Altura	762,110 m
Para: p2_01					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316641,839 m	Latitude	S23°27'06,25522"	Latitude	S23°27'06,25522"
Direção norte	7405328,265m	Longitude	O46°47'42,03609"	Longitude	O46°47'42,03609"
Elevação	852,612 m	Altura	849,581 m	Altura	849,581 m
Vetor					
Δ Direção leste	-723,357 m	Azimute avanço NS	210°09'55"	ΔX	-830,429 m
Δ Direção norte	-1280,934 m	Distância do elip.	1471,047 m	ΔY	-195,795 m
Δ Elevação	87,479 m	Δ Altura	87,472 m	ΔZ	-1201,761 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,005 m	σ Azimute avanço NS	0°00'01"	σ ΔX	0,013 m
σ Δ Norte	0,005 m	σ Dist. elipsoide	0,005 m	σ ΔY	0,015 m
σ Δ Elevação	0,021 m	σ ΔAltura	0,021 m	σ ΔZ	0,008 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0001738140		
y	-0,0001807062	0,0002378171	
Z	-0,0000835722	0,0000983586	0,0000671363

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP2	p2_01
Arquivo de dados:	Q0224A13.293	Q0228A99.293
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,525 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP2 - p2_02 (10:39:19-11:03:50) (S8)

Observação de linha de base:	BP2 --- p2_02 (B8)
Data do Processamento:	25/06/2019 11:32:16
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,014 m
Precisão vertical:	0,039 m
RMS:	0,025 m
PDOP Máximo:	3,770
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	05/06/2019 10:39:19 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	05/06/2019 11:03:50 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:24:31
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	BP2				
	Grid		Local		Global
Direção leste	317365,196 m	Latitude	S23°26'24,91411"	Latitude	S23°26'24,91411"
Direção norte	7406609,199m	Longitude	O46°47'15,99224"	Longitude	O46°47'15,99224"
Elevação	765,133 m	Altura	762,110 m	Altura	762,110 m
Para:	p2_02				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316832,592 m	Latitude	S23°27'09,04654"	Latitude	S23°27'09,04654"
Direção norte	7405244,762m	Longitude	O46°47'35,35266"	Longitude	O46°47'35,35266"
Elevação	846,070 m	Altura	843,040 m	Altura	843,040 m
Vetor					
Δ Direção leste	-532,605 m	Azimute avanço NS	202°02'05"	ΔX	-719,652 m
Δ Direção norte	-1364,437 m	Distância do elip.	1464,683 m	ΔY	-36,621 m
Δ Elevação	80,937 m	Δ Altura	80,931 m	ΔZ	-1277,947 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,005 m	σ Azimute avanço NS	0°00'01"	σ ΔX	0,014 m
σ Δ Norte	0,006 m	σ Dist. elipsoide	0,006 m	σ ΔY	0,013 m
σ Δ Elevação	0,020 m	σ Δ Altura	0,020 m	σ ΔZ	0,009 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0001911201		
y	-0,0001569807	0,0001656990	
Z	-0,0000943126	0,0000843344	0,0000868764

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP2	p2_02
Arquivo de dados:	Q0224A13.293	Q0228B99.293
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,525 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP2 - p2_03 (11:12:32-11:33:08) (S9)

Observação de linha de base:	BP2 --- p2_03 (B9)
Data do Processamento:	25/06/2019 11:32:16
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,017 m
Precisão vertical:	0,031 m
RMS:	0,022 m
PDOP Máximo:	3,214
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	05/06/2019 11:12:32 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	05/06/2019 11:33:08 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:20:36
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP2					
Grid		Local		Global	
Direção leste	317365,196 m	Latitude	S23°26'24,91411"	Latitude	S23°26'24,91411"
Direção norte	7406609,199m	Longitude	O46°47'15,99224"	Longitude	O46°47'15,99224"
Elevação	765,133 m	Altura	762,110 m	Altura	762,110 m
Para: p2_03					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316838,107 m	Latitude	S23°27'11,59368"	Latitude	S23°27'11,59368"
Direção norte	7405166,464m	Longitude	O46°47'35,19273"	Longitude	O46°47'35,19273"
Elevação	851,442 m	Altura	848,412 m	Altura	848,412 m
Vetor					
Δ Direção leste	-527,090 m	Azimute avanço NS	200°46'51"	ΔX	-734,323 m
Δ Direção norte	-1442,735 m	Distância do elip.	1535,983 m	ΔY	-14,370 m
Δ Elevação	86,309 m	Δ Altura	86,303 m	ΔZ	-1351,982 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,005 m	σ Azimute avanço NS	0°00'01"	σ ΔX	0,011 m
σ Δ Norte	0,007 m	σ Dist. elipsoide	0,007 m	σ ΔY	0,010 m
σ Δ Elevação	0,016 m	σ Δ Altura	0,016 m	σ ΔZ	0,010 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	Y	Z
X	0,0001157756		
Y	-0,0000848224	0,0001025311	
Z	-0,0000586472	0,0000726371	0,0000979561

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP2	p2_03
Arquivo de dados:	Q0224A13.293	Q0228C99.293
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,525 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP2 - p2_04 (11:35:30-11:55:40) (S10)

Observação de linha de base:	BP2 --- p2_04 (B10)
Data do Processamento:	25/06/2019 11:32:16
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,012 m
Precisão vertical:	0,025 m
RMS:	0,022 m
PDOP Máximo:	2,792

Efeméride usada: Preciso
 Modelo da antena: NGS Absolute
 Hora de início do processamento: 05/06/2019 11:35:30 (Local: UTC -3hr)
 Hora de fim do processamento: 05/06/2019 11:55:40 (Local: UTC -3hr)
 Duração do processamento: 00:20:10
 Intervalo de processamento: 1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	BP2				
	Grid		Local		Global
Direção leste	317365,196 m	Latitude	S23°26'24,91411"	Latitude	S23°26'24,91411"
Direção norte	7406609,199m	Longitude	O46°47'15,99224"	Longitude	O46°47'15,99224"
Elevação	765,133 m	Altura	762,110 m	Altura	762,110 m
Para:	p2_04				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316828,606 m	Latitude	S23°27'11,69208"	Latitude	S23°27'11,69208"
Direção norte	7405163,318m	Longitude	O46°47'35,52883"	Longitude	O46°47'35,52883"
Elevação	852,013 m	Altura	848,983 m	Altura	848,983 m
Vetor					
Δ Direção leste	-536,590 m	Azimute avanço NS	201°04'20"	ΔX	-741,744 m
Δ Direção norte	-1445,881 m	Distância do elip.	1542,219 m	ΔY	-20,405 m
Δ Elevação	86,880 m	Δ Altura	86,874 m	ΔZ	-1354,986 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,005 m	σ Azimute avanço NS	0°00'01"	σ ΔX	0,009 m
σ Δ Norte	0,004 m	σ Dist. elipsoide	0,005 m	σ ΔY	0,008 m
σ Δ Elevação	0,013 m	σ Δ Altura	0,013 m	σ ΔZ	0,007 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000880607		
y	-0,0000542685	0,0000637126	
Z	-0,0000437138	0,0000440002	0,0000504129

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP2	p2_04
Arquivo de dados:	Q0224A13.293	Q0228D99.293
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,525 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP2 - p2_05 (11:59:40-12:20:44) (S11)

Observação de linha de base: BP2 --- p2_05 (B11)
 Data do Processamento: 25/06/2019 11:32:20
 Tipo de solução: Fixo
 Frequência usada: Frequência dupla (L1, L2)
 Precisão horizontal: 0,016 m
 Precisão vertical: 0,025 m
 RMS: 0,022 m
 PDOP Máximo: 2,488
 Efeméride usada: Preciso
 Modelo da antena: NGS Absolute
 Hora de início do processamento: 05/06/2019 11:59:40 (Local: UTC -3hr)
 Hora de fim do processamento: 05/06/2019 12:20:44 (Local: UTC -3hr)
 Duração do processamento: 00:21:04
 Intervalo de processamento: 1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	BP2		
	Grid	Local	Global

Direção leste	317365,196 m	Latitude	S23°26'24,91411"	Latitude	S23°26'24,91411"
Direção norte	7406609,199m	Longitude	O46°47'15,99224"	Longitude	O46°47'15,99224"
Elevação	765,133 m	Altura	762,110 m	Altura	762,110 m

Para: p2_05					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316867,626 m	Latitude	S23°27'12,27639"	Latitude	S23°27'12,27639"
Direção norte	7405145,827m	Longitude	O46°47'34,16182"	Longitude	O46°47'34,16182"
Elevação	849,728 m	Altura	846,699 m	Altura	846,699 m

Vetor					
ΔDireção leste	-497,570 m	Azimute avanço NS	199°29'25"	ΔX	-719,794 m
ΔDireção norte	-1463,372 m	Distância do elip.	1545,630 m	ΔY	12,904 m
ΔElevação	84,595 m	Δ Altura	84,589 m	ΔZ	-1370,570 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,005 m	σ Azimute avanço NS	0°00'01"	σ ΔX	0,010 m
σ Δ Norte	0,005 m	σ Dist. elipsoide	0,006 m	σ ΔY	0,007 m
σ Δ Elevação	0,013 m	σ ΔAltura	0,013 m	σ ΔZ	0,007 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0001089201		
y	-0,0000532637	0,0000473116	
Z	-0,0000340059	0,0000434079	0,0000485770

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP2	p2_05
Arquivo de dados:	Q0224A13.293	Q0228E99.293
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,525 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:	0_Perus_4_correcao_base_ef.vce	Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:	52 KB	Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	02/07/2019 08:01:05 (UTC:-3)	Zona:	UTM zone 23S
Fuso horário:	Hora oficial do Brasil	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015

Relatório de processamento das linhas de base (BASE BP3 2019)

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo de solução	Prec. H (m)	Prec. V (m)	Az. geodésico	Dist. elip. (m)	ΔAltura (m)
POLI --- BP3 (B1)	POLI	BP3	Fixo	0,008	0,032	328°45'39"	13141,566	298,038

Resumo da aceitação

Data Processamento	Passado		Falha
1	1	0	0

POLI - BP3 (10:28:59-13:14:58) (S1)

Observação de linha de base:	POLI --- BP3 (B1)
Data do Processamento:	01/11/2019 08:40:25
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,008 m
Precisão vertical:	0,032 m
RMS:	0,017 m
PDOP Máximo:	1,618
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	10/06/2019 10:29:12 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	10/06/2019 13:14:57 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	02:45:45
Intervalo de processamento:	15 segundos

Componentes do vetor (marca a marca)

De: POLI					
Grid		Local		Global	
Direção leste	323390,708 m	Latitude	S23°33'20,33228"	Latitude	S23°33'20,33228"
Direção norte	7393902,043m	Longitude	O46°43'49,12319"	Longitude	O46°43'49,12319"
Elevação	733,670 m	Altura	730,622 m	Altura	730,622 m
Para: BP3					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316440,475 m	Latitude	S23°27'15,04542"	Latitude	S23°27'15,04542"
Direção norte	7405055,304m	Longitude	O46°47'49,25005"	Longitude	O46°47'49,25005"
Elevação	1031,692 m	Altura	1028,660 m	Altura	1028,659 m
Vetor					
Δ Direção leste	-6950,233 m	Azimuth avanço NS	328°45'39"	ΔX	-1706,197 m
Δ Direção norte	11153,261m	Distância do elip.	13141,566 m	ΔY	-8132,243 m
Δ Elevação	298,022 m	Δ Altura	298,038 m	ΔZ	10187,877 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,003 m	σ Azimuth avanço NS	0°00'00"	σ ΔX	0,010 m
σ Δ Norte	0,003 m	σ Dist. elipsoide	0,003 m	σ ΔY	0,011 m
σ Δ Elevação	0,016 m	σ Δ Altura	0,016 m	σ ΔZ	0,007 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000995135		
y	-0,0001037603	0,0001255602	
Z	-0,0000637216	0,0000743757	0,0000532528

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	POL1	BP3
Arquivo de dados:	poli1611.19o	Q0224B99.298
Tipo do receptor:	NetR9	SP60
Número de série do receptor:	5552R50037	5722550224
Tipo de antena:	Zephyr Geodetic 2 RoHS	SP60
Número de série da antena:	2612117453	5722550224
Altura da antena (medida):	0,050 m	1,753 m
Método de medição da antena:	Base da montagem da antena	Marca de medição de inclinação

Dados do arquivo do projeto		Sistema de coordenadas	
Nome:	0_Perus_4_correcao_gcps_ef.vce	Nome:	Brazil/SIRGAS2000
Tamanho:	62 KB	Datum:	SIRGAS2000
Modificado:	01/11/2019 08:59:35 (UTC:-3)	Zona:	UTM zone 23S
Fuso horário:	Hora oficial do Brasil	Geóide:	Brazil SIRGAS Geoid Model 2015

Relatório processamento das linhas de base (PONTOS APOIO – BP3/2019)

Resumo do processamento

Observação	De	Para	Tipo de solução	Prec. H (Metro)	Prec. V (Metro)	Azimute geodésico	Dist. elip. (Metro)	ΔAltura (Metro)
BP3 --- p3_4 (B5)	BP3	p3_4	Fixo	0,003	0,004	128°45'16"	16,201	0,749
BP3 --- p3_3 (B4)	BP3	p3_3	Fixo	0,003	0,004	34°14'59"	98,078	-42,711
BP3 --- p3_2 (B3)	BP3	p3_2	Fixo	0,004	0,008	127°55'08"	44,064	-2,597
BP3 --- p3_1 (B2)	BP3	p3_1	Fixo	0,005	0,006	118°57'44"	77,652	-11,134

Resumo da aceitação

Data Processamento	Passado		Falha
4	4	0	0

BP3 - perus4_4 (12:18:39-12:28:38) (S5)

Observação de linha de base:	BP3 --- perus4_4 (B5)
Data do Processamento:	01/11/2019 08:58:23
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,003 m
Precisão vertical:	0,004 m
RMS:	0,011 m
PDOP Máximo:	1,326
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	10/06/2019 12:18:39 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	10/06/2019 12:28:38 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:09:59
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP3					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316440,475 m	Latitude	S23°27'15,04542"	Latitude	S23°27'15,04542"
Direção norte	7405055,304m	Longitude	O46°47'49,25005"	Longitude	O46°47'49,25005"
Elevação	1031,692 m	Altura	1028,660 m	Altura	1028,659 m
Para: perus4_4					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316453,235 m	Latitude	S23°27'15,37509"	Latitude	S23°27'15,37509"
Direção norte	7405045,321m	Longitude	O46°47'48,80491"	Longitude	O46°47'48,80491"
Elevação	1032,440 m	Altura	1029,408 m	Altura	1029,408 m
Vetor					
Δ Direção leste	12,760 m	Azimute avanço NS	128°45'16"	ΔX	6,917 m
Δ Direção norte	-9,983 m	Distância do elip.	16,201 m	ΔY	11,093 m
Δ Elevação	0,749 m	Δ Altura	0,749 m	ΔZ	-9,603 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,001 m	σ Azimute avanço NS	0°00'17"	σ ΔX	0,002 m
σ Δ Norte	0,001 m	σ Dist. elipsoide	0,001 m	σ ΔY	0,002 m
σ Δ Elevação	0,002 m	σ ΔAltura	0,002 m	σ ΔZ	0,001 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000031095		
y	-0,0000014326	0,0000032260	
Z	-0,0000005243	0,0000007006	0,0000017783

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP3	perus4_4
Arquivo de dados:	Q0224B99.298	Q0228D99.298

Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,753 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP3 - perus4_3 (11:53:35-12:03:34) (S4)

Observação de linha de base:	BP3 --- perus4_3 (B4)
Data do Processamento:	01/11/2019 08:58:23
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)
Precisão horizontal:	0,003 m
Precisão vertical:	0,004 m
RMS:	0,009 m
PDOP Máximo:	1,467
Efeméride usada:	Preciso
Modelo da antena:	NGS Absolute
Hora de início do processamento:	10/06/2019 11:53:35 (Local: UTC -3hr)
Hora de fim do processamento:	10/06/2019 12:03:34 (Local: UTC -3hr)
Duração do processamento:	00:09:59
Intervalo de processamento:	1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De:	BP3				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316440,475m	Latitude	S23°27'15,04542"	Latitude	S23°27'15,04542"
Direção norte	7405055,304m	Longitude	O46°47'49,25005"	Longitude	O46°47'49,25005"
Elevação	1031,692 m	Altura	1028,660 m	Altura	1028,659 m
Para:	perus4_3				
	Grid		Local		Global
Direção leste	316494,658 m	Latitude	S23°27'12,41017"	Latitude	S23°27'12,41017"
Direção norte	7405137,059m	Longitude	O46°47'47,30524"	Longitude	O46°47'47,30524"
Elevação	988,980 m	Altura	985,948 m	Altura	985,948 m
Vetor					
Δ Direção leste	54,183 m	Azimuth avanço NS	34°14'59"	ΔX	35,511 m
Δ Direção norte	81,755 m	Distância do elip.	98,078 m	ΔY	42,831 m
Δ Elevação	-42,712 m	Δ Altura	-42,711 m	ΔZ	91,384 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,001 m	σ Azimuth avanço NS	0°00'02"	σ ΔX	0,002 m
σ Δ Norte	0,001 m	σ Dist. elipsoide	0,001 m	σ ΔY	0,002 m
σ Δ Elevação	0,002 m	σ Δ Altura	0,002 m	σ ΔZ	0,001 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	Y	Z
X	0,0000027064		
Y	-0,0000011154	0,0000025193	
Z	-0,0000006361	0,0000007135	0,0000017545

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP3	perus4_3
Arquivo de dados:	Q0224B99.298	Q0228C99.298
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,753 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP3 - perus4_2 (11:25:43-11:37:15) (S3)

Observação de linha de base:	BP3 --- perus4_2 (B3)
Data do Processamento:	01/11/2019 08:58:23
Tipo de solução:	Fixo
Frequência usada:	Frequência dupla (L1, L2)

Precisão horizontal: 0,004 m
 Precisão vertical: 0,008 m
 RMS: 0,015 m
 PDOP Máximo: 2,276
 Efeméride usada: Preciso
 Modelo da antena: NGS Absolute
 Hora de início do processamento: 10/06/2019 11:25:43 (Local: UTC -3hr)
 Hora de fim do processamento: 10/06/2019 11:37:15 (Local: UTC -3hr)
 Duração do processamento: 00:11:32
 Intervalo de processamento: 1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP3					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316440,475m	Latitude	S23°27'15,04542"	Latitude	S23°27'15,04542"
Direção norte	7405055,304m	Longitude	O46°47'49,25005"	Longitude	O46°47'49,25005"
Elevação	1031,692 m	Altura	1028,660 m	Altura	1028,659 m
Para: perus4_2					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316475,572 m	Latitude	S23°27'15,92564"	Latitude	S23°27'15,92564"
Direção norte	7405028,661m	Longitude	O46°47'48,02531"	Longitude	O46°47'48,02531"
Elevação	1029,095 m	Altura	1026,063 m	Altura	1026,063 m
Vetor					
Δ Direção leste	35,097 m	Azimute avanço NS	127°55'08"	ΔX	16,332 m
Δ Direção norte	-26,643 m	Distância do elip.	44,064 m	ΔY	33,395 m
Δ Elevação	-2,597 m	Δ Altura	-2,597 m	ΔZ	-23,812 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'08"	σ ΔX	0,003 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,003 m
σ Δ Elevação	0,004 m	σ Δ Altura	0,004 m	σ ΔZ	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000092572		
y	-0,0000058762	0,0000082165	
Z	-0,0000042716	0,0000046449	0,0000059427

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP3	perus4_2
Arquivo de dados:	Q0224B99.298	Q0228B99.298
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,753 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

BP3 - perus4_1 (11:03:16-11:15:40) (S2)

Observação de linha de base: BP3 --- perus4_1 (B2)
 Data do Processamento: 01/11/2019 08:58:23
 Tipo de solução: Fixo
 Frequência usada: Frequência dupla (L1, L2)
 Precisão horizontal: 0,005 m
 Precisão vertical: 0,006 m
 RMS: 0,014 m
 PDOP Máximo: 1,989
 Efeméride usada: Preciso
 Modelo da antena: NGS Absolute
 Hora de início do processamento: 10/06/2019 11:03:16 (Local: UTC -3hr)
 Hora de fim do processamento: 10/06/2019 11:15:40 (Local: UTC -3hr)
 Duração do processamento: 00:12:24
 Intervalo de processamento: 1 segundo

Componentes do vetor (marca a marca)

De: BP3					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316440,475m	Latitude	S23°27'15,04542"	Latitude	S23°27'15,04542"
Direção norte	7405055,304m	Longitude	O46°47'49,25005"	Longitude	O46°47'49,25005"
Elevação	1031,692 m	Altura	1028,660 m	Altura	1028,659 m
Para: perus4_1					
Grid		Local		Global	
Direção leste	316508,882 m	Latitude	S23°27'16,26769"	Latitude	S23°27'16,26769"
Direção norte	7405018,553m	Longitude	O46°47'46,85627"	Longitude	O46°47'46,85627"
Elevação	1020,557 m	Altura	1017,525 m	Altura	1017,525 m
Vetor					
Δ Direção leste	68,406 m	Azimute avanço NS	118°57'44"	ΔX	32,292 m
Δ Direção norte	-36,751 m	Distância do elip.	77,652 m	ΔY	64,876 m
Δ Elevação	-11,135 m	Δ Altura	-11,134 m	ΔZ	-30,069 m

Desvio Padrão

Erros de vetor:					
σ Δ Leste	0,002 m	σ Azimute avanço NS	0°00'05"	σ ΔX	0,003 m
σ Δ Norte	0,002 m	σ Dist. elipsoide	0,002 m	σ ΔY	0,002 m
σ Δ Elevação	0,003 m	σ Δ Altura	0,003 m	σ ΔZ	0,002 m

Matriz Variância Covariância (Metro²)

	X	y	Z
X	0,0000065103		
y	-0,0000030947	0,0000052003	
Z	-0,0000017326	0,0000025197	0,0000047907

Ocupações

	De	Para
ID do ponto:	BP3	perus4_1
Arquivo de dados:	Q0224B99.298	Q0228A99.298
Tipo do receptor:	SP60	SP60
Número de série do receptor:	5722550224	5722550228
Tipo de antena:	SP60	SP60
Número de série da antena:	5722550224	5722550228
Altura da antena (medida):	1,753 m	2,000 m
Método de medição da antena:	Marca de medição de inclinação	Base da montagem da antena

Estilo de processamento

Máscara de elevação:	10°00'00,0"
Processamento automático:	Sim
Iniciar numeração de ID automático:	AUTO0001
Vetores contínuos:	Não
Gerar resíduos:	Sim
Modelo da antena:	Automático
Tipo de efemérides:	Preciso
Frequência:	Várias frequências
Intervalo de processamento:	0,02 segundo
Forçar flutuação:	Não
Tipo de processamento de GIS:	Processamento de portadora e código automático

CrITÉRIOS de aceitação

Componente do vetor	Valor	Falha
Precisão horizontal >	0,020 m + 1,000 ppm	0,050 m + 1,000 ppm
Precisão vertical >	0,050 m + 1,000 ppm	0,100 m + 1,000 ppm