

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

RAFAELA SOARES NIEMANN

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E GERAÇÃO DE
MODELOS DIGITAIS DE TERRENO A PARTIR DE IMAGENS
OBTIDAS POR VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO



Rio Claro - SP
2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

RAFAELA SOARES NIEMANN

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E GERAÇÃO DE
MODELOS DIGITAIS DE TERRENO A PARTIR DE IMAGENS
OBTIDAS POR VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do
Campus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geografia

Orientador: Thiago Sanna Freire Silva

Rio Claro - SP

2017

RAFAELA SOARES NIEMANN

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E GERAÇÃO DE MODELOS
DIGITAIS DE TERRENO A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS POR VEÍCULO AÉREO
NÃO-TRIPULADO

Exemplar apresentado para Exame Geral de
Defesa apresentada ao Instituto de Geociências
e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de pesquisa: Análise Ambiental
Orientador: Dr. Thiago Sanna Freire Silva
Bolsa: CAPES

Data da Defesa 07/ 12 / 2017 - APROVADA

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Presidente e orientador: Dr. Thiago Sanna Freire Silva
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Membro Titular: Carlos Henrique Grohmann
Universidade de São Paulo

Membro Titular: Cenira Maria Lupinacci da Cunha
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Local: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
UNESP – Campus de Rio Claro

621.3678 Niemann, Rafaela Soares
N671c Comparação de métodos de filtragem e geração de modelos digitais de terreno a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não-tripulado / Rafaela Soares Niemann. - Rio Claro, 2017
140 f. : il., figs., gráfs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Thiago Sanna Freire Silva

1. Sensoriamento remoto. 2. VANT. 3. MDT. 4. Nuvem de pontos. 5. Filtragem. 6. Interpolação. I. Título.

Dedico essa dissertação
A minha mamãe, meu papai, minha irmã, e minha gata *Rubisco* querida.

Lua

Morta

Rua

Torta

Tua

Porta

Serena Sintética - Cassiano Ricardo, 1957

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por permitir estar neste Universo e poder compadecer de sua ampla sabedoria divina. E ao meu anjo da guarda, sempre cuidadoso, zeloso e iluminado companheiro.

Aos seres desta Terra, agradeço a minha família, Mãe, Pai e Irmã que sempre me incentivaram, sempre me cuidaram e me amaram de forma zelosa e cuidadosa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Sanna Freire Silva, por acreditar em mim até nas vezes em que eu mesma não acreditava nas diversas etapas (antes, durante e depois) deste projeto. Agradeço por todo conhecimento adquirido nesta etapa, além das oportunidades oferecidas.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann, pela ajuda em dúvidas, conhecimento com GRASS GIS, esclarecimentos e oportunidades.

A Profa. Dra. Leonor Patricia Cerdeira Morellato, que oportunizou a inserção do meu estudo dentro de seu projeto, além de auxílio às coletas em campo, uso dos VANTs de seus projetos, computadores e técnicos que auxiliaram na execução dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. Mário Luis Assine, pela cessão dos receptores GPS e ao Dr. Leonardo Cancian e Ms. Bruno Borges pelo auxílio em campo.

Aos meus amigos e companheiros de Laboratório, os “Ecodynos” que estavam presentes em momentos certos para risadas, choros, bobagens, cafés, “horas felizes”, incentivos e conhecimento diários – Carlos Leandro Oliveira, Beatriz Daunt, João Sobreiro, Annia Streher, Camilla “Aleluia” Casela, Larissa Sayuri, Bianca Darski, Jefferson Ferreira-Ferreira, Swanni Alvarado, André Beig, Julio, Abner, Brunão, Luis “Cotia”, Luiz Furtado, Rodrigo Nunes.

As equipes gestoras, alunos e Professores das Escolas Estaduais João Cursino de São José dos Campos (Pecora, Ieda e Margareth), Escola Odilon Correa de Rio Claro (Thelma, Adriana e Cristiane) e Escola Pedro Raphael da Rocha de Santa Gertrudes (Iara, Valentim, Célia e Maria Fernanda) pela compreensão dos dias de ausência para execução da pesquisa.

RESUMO

Os modelos digitais de elevação são importantes para a geração de informações sobre variáveis ambientais correlacionadas à topografia, principalmente como subsídio à análises geomorfométricas. O sensoriamento remoto pode contribuir com a geração de modelos digitais de elevação, principalmente através do uso de sensores de alta resolução espacial e tecnologias avançadas. Os VANTs – Veículos Aéreos Não Tripulados – tem sido cada vez mais explorados no âmbito da cartografia e topografia, com atuação cada vez mais importante dentro da ciência, devido à capacidade de transportarem diferentes sensores e ao seu baixo custo de operação. Câmeras fotográficas simples acopladas aos VANTs podem ser combinadas com tecnologias de visão computacional, trazendo novas oportunidades para explorar a geração de modelos digitais de elevação. Algoritmos de visão computacional, como o *Structure-from-Motion (SfM)*, permitem a extração de pontos tridimensionais a partir de imagens sobrepostas obtidas por VANTs. Esses pontos compõem nuvens de pontos capazes de subsidiar a geração de modelos digitais de superfície (MDS), quando combinadas com algoritmos de interpolação de dados. Contudo, os modelos gerados desta maneira nos retornam informações relacionadas à superfície dos objetos presentes sobre o terreno, incluindo por exemplo construções e dosséis vegetais. A filtragem e classificação das nuvens de pontos se faz assim necessária para geração de modelos digitais que descrevam mais fielmente a superfície do terreno, sem estes elementos. Nesta dissertação, avaliamos dois métodos para a filtragem e interpolação de modelos digitais de terreno (MDT) a partir de nuvens de pontos geradas por imageamento ótico baseado em VANTs. A área de estudo escolhida foi a região da Serra do Cipó-MG, caracterizada por relevo acidentado e cobertura vegetal variada. O primeiro método consistiu na filtragem (classificação) direta da nuvem de pontos, e o segundo na filtragem do modelo digital de superfície em formato *raster*, ambos seguidos de interpolação. Os métodos avaliados se mostraram adequados, com coeficientes de determinação da ordem de $R^2 = 0,98$ em relação a dados de referência tomados por DGPS. A filtragem foi bastante eficiente para áreas íngremes e com vegetação baixa, e menos eficiente em áreas de vegetação arbórea densa. Os métodos avaliados no presente trabalho contribuirão para a melhoria da geração de MDTs com base na tecnologia emergente oferecida pelos VANTs, que poderão ser utilizados como subsídios a estudos ambientais diversos.

PALAVRAS CHAVES: Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), modelos digitais de elevação, nuvem de pontos

ABSTRACT

Digital elevation models are important for producing information on different environmental variables correlated to topography, especially for geomorphometric analyses. Remote sensing can contribute to the generation of digital elevation models, mainly through high spatial resolution sensors and advanced technologies. UAVs - Unmanned Aerial Vehicles - have been increasingly employed in the fields of cartography and topography, and have had an increasingly prominent role in science, as they can carry different sensors and have low-cost operation. Simple cameras attached to UAVs can be combined with computer vision technologies, bringing new opportunities to explore the production of digital elevation models. Computer vision algorithms such as Structure-from-Motion (SfM) allow the extraction of three-dimensional points from superimposed images obtained by UAVs. These points make up point clouds capable of supporting the production of digital surface models (DSM) when combined with interpolation algorithms. However, models generated this way give us information related to the surface of objects present on the ground, including buildings and plant canopies. Point cloud filtering and classification is thus necessary for producing digital models that more accurately describe the bare terrain surface. In this dissertation, we evaluated two methods for filtering and interpolating digital terrain models (DTM) from point clouds generated by UAV-based optical imaging. The chosen study area was the Serra do Cipó region (Minas Gerais, Brazil), characterized by rugged relief and heterogeneous vegetation cover. The first method consisted of direct filtering (classification) of the point cloud, and the second method was based on filtering the digital surface model in raster format, both followed by interpolation. The evaluated methods were adequate, with determination coefficients of the order of $R^2 = 0.98$ in relation to reference data taken by DGPS. Filtering was quite efficient for steep areas with low vegetation, and less efficient in areas of dense arboreal vegetation. The methods evaluated in the present work will contribute to the improvement and generation of DTMs based on the emerging technology offered by UAVs, which can be used as subsidies to diverse environmental studies.

KEY WORDS: unmanned aerial vehicles (UAVs), digital elevation models, point clouds

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes modelos de VANTs utilizados em imageamentos e fotografias aéreas. Em “A” modelo <i>Phantom</i> da empresa DJI, em “B” VANT modelo AEE F100, “C” modelo ARCTEC, “D” modelo <i>Yuneec Tornado H920</i> , “E” modelo <i>Penguin B UAV platform</i> , “F” modelo <i>Ebee</i> da Sensefly (Fotos de divulgação das empresas).....	6
Figura 2. Modelo matricial com coordenadas X, Y e de altitudes em Z e um modelo digital de elevação em representação em 3D.....	9
Figura 3. Representação do modelo digital de superfície e do modelo digital de terreno.....	10
Figura 4 - Localização da área de estudo. A esquerda, o mapa do Brasil no canto superior e a localização do estado de Minas gerais e o posicionamento da Serra do Cipó, na figura abaixo a delimitação da Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira com um modelo digital de elevação derivado do Shuttle Radar Topography Mission - SRTM. A localização das três áreas imageadas para o presente estudo (Vellozia, Cedro, Quadrante 16) está indicada na figura principal.	18
Figura 5 - Distribuição da vegetação de Cerrado e do Campos Rupestres em um perfil altitudinal (LE STRADIC, 2012).	21
Figura 6 -. Sequência dos procedimentos metodológicos realizados nesta dissertação	22
Figura 9. Na fotografia “A” exemplo de uma vegetação de Campo arenoso na área 2 ou no Cedro, e em “B” uma foto de Campo Pedregoso.	24
Figura 10. Fotografia “A” mostrando os micro-habitats entremeados em afloramentos rochosos, e fotografia “B” mostrando área aberta de gramíneas presentes na área 3.....	24
Figura 11. VANT utilizado na aquisição das imagens, modelo G-Plane	25
Figura 12. Linhas de vôo pré-definidas com auxílio do software Mission Planner, relativas às áreas 1 (A), área 2 (B) e área 3 (C). Imagem de fundo: Google EarthTM.....	27
Figura 13. Vista superior do resultado de imageamento da Área 1. As fotografias aéreas com os pontos em verde são as localizações centrais de cada fotografia registradas pelo GPS no momento de sua tomada, e os pontos azuis indicam a estimativa de posição por auto-ajuste realizada através do algoritmo <i>Structure-from-motion</i> , implementado no software PIX4D Mapper 3.1.2.....	28
Figura 14. Fotografia da coleta dos dados em campo em um alvo para processamento dos DGCPs.....	33
Figura 15. Esquema de coleta dos pontos em campo	34

Figura 16. Exemplo de nuvens de pontos em formato .las da Área 1 (Vellozia).....	36
Figura 17. Modelo digital de superfície das três áreas processadas, com sobreposição de sombreamento de terreno com <i>raster</i> de relevo sombreado com ângulo de elevação a 40° e azimute a 300°. Em A, temos a área 1, em B a área 2 e em C a área 3.	38
Figura 18. Modelo digital de terreno da área 1, filtrado com o algoritmo DTM-filter, mostrado com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimute a 80°.....	39
Figura 19. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por raster da área 1. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1. A área sombreada ao longo da linha azul representa o intervalo de confiança de 95% em relação ao modelo de regressão estimado.....	40
Figura 20. Pontos da área 1 onde ocorreram os maiores erros de filtragem dos modelos. Em “A” o ponto 35, dentro de uma área de mata ciliar; em “B” o ponto 47, área com campo pedregoso, com declividade um pouco acentuada e também próximo a uma área de mata ciliar.....	40
Figura 21. Modelo digital de terreno da área 2, com sombreamento de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 40° e azimute a 300°.....	41
Figura 22. Fotografias da área 2, com os pontos onde ocorreram as maiores diferenças de filtragem dos modelos. Em “A” o ponto 59, fica em área aberta de campo pedregoso com vegetação de gramíneas esparsas e baixas (média de altura da vegetação de 0,37 centímetros), e em “B” o ponto 44, que fica próximo ao Rio Cipó e de sua mata ciliar, com arvoretas e herbáceas com uma média de vegetação de 2,95 metros.	42
Figura 23. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por raster da área 2. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1. A área sombreada ao longo da linha azul representa o intervalo de confiança de 95% em relação ao modelo de regressão estimado.....	43
Figura 24. Modelo digital de terreno da área 3, com sombreamento de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimute a 80°.....	44
Figura 25. Fotografias da área 3 (Quadrante 16) com os pontos onde ocorreram as maiores diferenças de filtragem dos modelos. Em “A” o ponto 89, fica em área de desnível de afloramento rochoso, com presença de arvoretas e herbáceas em seus entremeios (média de	

altura da vegetação de 1,18 metros e diferença de filtragem de 1,13 metros), e em “B” o ponto 33, que também fica próximo a afloramento rochoso e arvoretas, com uma média de vegetação de 0,76 centímetros e diferença de estimação de -1,31 metros.	45
Figura 26. Comparação entre valores observados versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por raster da área 3. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1	45
Figura 27. Modelo digital de terreno gerado por filtragem da nuvem de pontos para a Área 1 com sombreado de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimuth a 80°.	47
Figura 28. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por nuvem de pontos na Área 1. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados extraídos do MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1.	48
Figura 29. Modelo digital de terreno filtrado pelo algoritmo Mcc-lidar da área 2, com sombreado de terreno com ângulo de elevação a 65° e azimuth a 80°, com exagero vertical de 1,5.	49
Figura 30. Modelo digital de terreno da área 3, com sombreado de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimuth a 80°.	50
Figura 31. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por nuvem de pontos na área 2. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em formato MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1.	51
Figura 32. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por nuvem de pontos na Área 3. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em formato MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1.	51
Figura 33 – Perfis Longitudinais de área com vegetação baixa e esparsa.	53
Figura 34 - Perfis Longitudinais de área com vegetação alta e densa.	53

Figura 35 – Ilustração do terreno real com seu extrato arbóreo de densidade alta e cobertura vegetal próxima a superfície da borda das áreas de mananciais e como o modelo digital de terreno realiza esta feição, identificando a vegetação como uma nova forma no terreno.	54
Figura 36. Distribuição das alturas da vegetação e dos erros estimados encontrados em cada modelo digital de elevação gerado dentro deste trabalho.	55
Figura 37. Mapa das diferenças entre o modelo digital de superfície da área 1 e o modelo digital de terreno filtrado com o algoritmo Mcc-lidar. O zoom das áreas nos mostra as diferenças de cobertura vegetal na área e os objetos filtrados na cor vermelha na figura.	56
Figura 38. Mapa das diferenças entre o modelo digital de superfície da área 3 e o modelo digital de terreno filtrado com o algoritmo Mcc-lidar. O zoom das áreas nos mostra as diferenças de cobertura vegetal na área e os objetos filtrados na cor vermelha na figura.	57
Figura 39. Mapa das diferenças entre o modelo digital de superfície da área 2 e o modelo digital de terreno filtrado com o algoritmo Mcc-lidar. O zoom das áreas nos mostra as diferenças de cobertura vegetal na área e os objetos filtrados na cor vermelha na figura.	57
Figura 40. Variações da distância entre o sensor e a superfície devido à diferenças na altitude de decolagem e variação topográfica nas linhas de voo para as três áreas imageadas.	59
Figura 41. Declividade geradas nos diferentes MDSs e MDTs das três áreas imageadas. Na sequência, em “A” o MDS, o MDT filtrado com o método de nuvem de pontos e o MDT filtrado com o método raster da Área 1, em “B” o MDS, o MDT filtrado com o método de nuvem de pontos e o MDT filtrado com o método raster da Área 2 e em “C” o MDS, o MDT filtrado com o método de nuvem de pontos e o MDT filtrado com o método raster da Área 3.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação dos resultados da geração de nuvens de pontos a partir das imagens aéreas coletadas utilizando VANT.	37
Tabela 2 - Números de nuvem de pontos gerados após as filtrações com o algoritmo <i>Mcc-LiDAR</i>	46
Tabela 3 - Valores obtidos nas análises estatísticas entre os dois métodos de filtração e interpolação de dados	52

LISTA DE ABREVIATURAS

ANAC	Agencia Nacional de Aviação Brasileira
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
DGPS	<i>Differential Global Position System</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
PNSC	Parque Nacional da Serra do Cipó
SfM	<i>Structure-from-Motion</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	viii
1. INTRODUÇÃO:.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA FUNDAMENTAL	6
3.1 Os Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs.....	6
3.2 Modelos digitais de elevação	9
3.3 O algoritmo Structure-from-Motion ou “estrutura a partir de movimento”	11
3.4 Métodos de Filtragem de dados tridimensionais de terreno	13
3.5 Interpolações de dados tridimensionais	15
4. ÁREA DE ESTUDO	18
5. MÉTODOS.....	22
5.1 Seleção das áreas de estudo:	22
5.3 Aquisição das imagens.....	25
5.4 Geração das nuvens de pontos	28
5.5 Filtragem das nuvens de pontos e modelos de superfície	30
5.5.1. Filtragem a partir de dados raster	30
5.5.2 Filtragem a partir da nuvem de pontos:	31
5.6 Coleta de pontos de campo para validação dos modelos de elevação de terreno	33
5.7 Validação e análises estatísticas.....	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6.1 Gerações das nuvens de pontos através do algoritmo Structure-From-Motion.....	36
6.2 Filtragens com o método DTMfilter	38
6.3 Filtragens das nuvens de pontos	46
6.4 Avaliação dos erros e comparação entre os resultados.....	52
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	65

1. INTRODUÇÃO:

A topografia é um componente fundamental para o entendimento dos processos geofísicos e biológicos das camadas superiores próximas da superfície Terrestre (HUGGETT; CHEESMAN, 2002). Descrever a topografia de acordo com as métricas da paisagem auxilia na identificação e delineamento exatos do terreno, evidenciando informações como acidentes geográficos e as configurações naturais e artificiais do terreno. Este delineamento pode nos proporcionar a compreensão de diferentes processos ambientais, como os fatores de formação de solo (BENITES et al., 2007), as características climáticas e meteorológicas de controle hidrológico local (LI; WONG, 2010), o transporte de água, os arranjos hidrológicos e hidrosedimentológicos e a percolação no solo (PROGRAMME, 2002), assim como a distribuição da cobertura vegetal (FLORINSKY; KURYAKOVA, 1996; JELASKA, 2009; LUCIEER et al., 2014; TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012b).

A descrição da topografia é feita através do cálculo de variáveis geomorfométricas, como declividade, orientação de vertente, curvaturas horizontais e verticais, rugosidade, e outras, as quais fornecem informações acerca das direções, posições, localizações e formas das vertentes em diferentes morfologias do terreno (ANDERS et al., 2013; EVANS, 2012a; PIKE; EVANS; HENGL, 2009a), e podem auxiliar no entendimento da dependência entre as variáveis ambientais e as variações de altitude. As variáveis geomorfométricas podem ser calculadas diretamente utilizando modelos digitais de elevação (MDEs), representações matemáticas da forma da superfície baseadas em uma matriz ou grade (células ou pixels), onde as linhas e colunas indicam a posição da célula no espaço, e o valor da célula indica a elevação local (EVANS, 2012a; PIKE; EVANS; HENGL, 2009b). Além da morfometria, diversas variáveis ambientais podem ser derivadas dos modelos digitais de elevação, como por exemplo estimativas de radiação solar incidente em função da variação topográfica e sombreamento, e índices de umidade, a partir da distribuição espacial da precipitação com a ajuda de um MDE ou a partir do Índice de Saturação do Solo (*Topographic Wetness Index* - TWI), uma medida relativa das condições hidrológicas de uma determinada paisagem (PIKE; EVANS; HENGL, 2009a; SØRENSEN; SEIBERT, 2007; WILSON, 2012).

A maneira mais antiga e tradicional de geração de modelos de terreno é através de coletas em campo, com auxílio de instrumentos como teodolitos e estações totais, utilizados para medir pontos que representem diferenças topográficas no terreno. Contudo, o custo e complexidade destes métodos pode se tornar um fator limitante para a coleta de dados em grandes extensões ou com alto grau de detalhe. Neste sentido, os métodos de sensoriamento remoto sempre contribuíram de maneira proeminente para a geração de dados topográficos tridimensionais, através de diferentes tecnologias.

Um dos métodos clássicos de geração de modelos de elevação através de dados de sensoriamento remoto é a fotogrametria, que utiliza fotografias aéreas analógicas ou digitais com sobreposições entre si, se valendo do processo chamado de estereoscopia. Contudo, essa metodologia requer dados com configurações de aquisição específicas, e normalmente resolução espacial elevada, raramente disponibilizadas de maneira gratuita para utilização em pesquisas geomorfológicas e de entendimento dos agentes do espaço. Nas últimas décadas, o desenvolvimento sensores usando a tecnologia *Light Detection and Ranging (LiDAR)* resultou em um dos métodos mais precisos para geração de modelos digitais de elevação, capaz de fornecer resultados acurados mesmo em regiões cobertas por vegetação densa (LIU; ZHANG, 2007). Os dados gerados a partir de um sensor *LiDAR* representam pontos tridimensionais na superfície, com informação de coordenadas espaciais x e y e de altitude z , compondo a chamada nuvem de pontos. Estas nuvens podem ser posteriormente convertidas em modelos de elevação com alta precisão e acurácia horizontal e vertical, e com alta resolução espacial (EVANS, 2012b; EVANS; HUDAK, 2007; HLADIK; ALBER, 2012; PIROTTI; TAROLLI, 2010; XIAOYE LIU, 2008). A geração de MDEs usando *LiDAR* tem suplantado, na literatura, o uso de modelos gerados por fotogrametria tradicional, devido ao fato de que os múltiplos retornos penetram o dossel vegetal, favorecendo a identificação da superfície e distinção dos elementos do chão (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010). Contudo, estes sensores apresentam um custo de aquisição extremamente elevado, e são comumente transportados em aeronaves tripuladas (assim como as câmeras fotogramétricas tradicionais), incorrendo em alto custo de operação.

Nos últimos anos, o crescimento exponencial do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como “*drones*”, tem oferecido alta flexibilidade de aquisição de dados, permitindo o acoplamento de diferentes tipos de sensores para imageamento, desde câmeras fotográficas simples (RGB) até sensores complexos como

LiDAR, sensores hiperespectrais, sensores termais, sonares e outros. Além disto, estas plataformas possuem muitas vezes um custo de aquisição acessível, e custo de operação significativamente inferior à operação de aeronaves tripuladas, reduzindo assim grandemente o custo total de aquisição de dados. Este baixo custo tem sido relevante para a ciência, em trabalhos científicos que abordem, por exemplo, o relevo, a geologia e a distribuição da vegetação, já que o imageamento por sensores em VANTs permite a geração de modelos digitais de elevação, ortoimagens, contornos ou curvas de nível, e modelos tridimensionais texturizados (GUPTA; GHONGE, 2013; NEX; REMONDINO, 2013).

Na maioria das vezes, as imagens obtidas por VANTs são resultantes do uso de câmeras fotográficas digitais simples, do tipo RGB, e que diferentemente da fotogrametria tradicional não possuem calibração das imagens originais. Contudo, estas imagens tem sido usadas com sucesso para a geração de dados fotogramétricos através da inovação e desenvolvimento de algoritmos de visão computacional robustos, que realizam a identificação e associação de pontos correlatos nas fotografias aéreas obtidas (TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012c; WESTOBY et al., 2012). Esta tecnologia minimiza algumas das limitações de calibração existentes na fotogrametria tradicional, como a falta de definição geométrica de algumas feições pertencentes aos imageamentos e a dificuldade de separação entre elementos de terreno e de superfície (NEX; REMONDINO, 2013; REMONDINO et al., 2011, 2012).

O resultado da aplicação destes algoritmos sobre fotografias aéreas que tenham uma boa porcentagem de sobreposição em seu imageamento é a geração de uma nuvem de pontos densificada, semelhante às nuvens de pontos obtidas por sensores *LiDAR*. Estes algoritmos são baseados no conceito de *Structure-from-Motion*, um método de visão computacional derivado dos princípios da estereoscopia que eram utilizados na fotogrametria tradicional, onde as informações de distância são obtidas através da paralaxe resultante da sobreposições das imagens, gerando uma estrutura de pontos em três dimensões (JAVERNICK; BRASINGTON; CARUSO, 2014; WALLACE et al., 2012; WESTOBY et al., 2012). O algoritmo *SfM* extrai automaticamente os pontos correlacionados em fotos individuais, identificando feições correspondentes entre fotos e otimizando a localização tridimensional de feições correspondentes, de acordo com parâmetros internos da câmera usados juntamente com algoritmos de ajuste (DANDOIS; ELLIS, 2013a). Em particular, este algoritmo é capaz de extrair a informação da posição sem precisar de uma calibração anterior precisa, ou de conhecimento prévio sobre a ótica e geometria de câmeras, sendo este o seu grande diferencial

em relação à fotogrametria tradicional, já que pode ser aplicado até em fotografias tiradas por diferentes tipos de câmeras (SNAVELY, 2011).

Independentemente do método, modelos digitais de elevação gerados com altas resoluções espaciais costumam incluir artefatos que podem afetar a descrição da morfometria com exatidão. Por exemplo, modelos digitais de elevação relativos a regiões onde se encontram edificações, espécies arbóreas ou qualquer outro elemento, a presença destes elementos irá resultar em uma representação errônea da real elevação do terreno. Quando filtramos os modelos digitais de superfície (MDS) para remoção destes objetos sobre a superfície, obtemos modelos digitais de terreno (MDT). Os artefatos que não forem retirados de forma precisa podem introduzir um erro no terreno representado nos modelos digitais de elevação, assim como na derivação destes modelos em variáveis geomorfológicas, quando não bem filtrados ou classificados durante a geração de seus MDTs. Com filtrações robustas e interpoladores que possam reproduzir da melhor forma a superfície da terra, podemos diminuir significativamente os erros e ruídos destes modelos durante o seu processamento.

Com o intuito de auxiliar novas pesquisas e a geração de MDTs com melhor precisão, o presente estudo analisa o potencial de dados obtidos a partir de imageamento RGB por VANTs para a geração de modelos digitais de terreno em áreas de Campos Rupestres, na região da Serra do Cipó (MG). Serão apresentadas as técnicas utilizadas na geração de nuvens de pontos, e de filtração para obtenção dos dados de terreno e de superfície a partir dos MDEs.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação foi avaliar diferentes métodos de geração de modelos digitais de terreno a partir de dados resultantes da aplicação de algoritmos de visão computacional para geração de nuvens de pontos tridimensionais a partir de fotografias aéreas digitais obtidas por VANTs. Para tanto, definimos os seguintes objetivos específicos:

- a) Gerar as nuvens de pontos tridimensionais a partir da aplicação de algoritmos de visão computacional do tipo *Structure-from-Motion* sobre as fotografias aéreas obtidas por VANT;
- b) Aplicar dois métodos de filtragem e interpolação dos dados para geração de modelos digitais de terreno; método de filtragem *DTM-filter* e *Mcc-LiDAR* e métodos de interpolação *Splines* Regularizadas por Tensão e *Bicubico*;
- c) Avaliar a acurácia e aplicabilidade dos dois métodos de filtragem aplicados para a geração de modelos digitais de terreno a partir do imageamento ótico realizado por VANT.

3. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA FUNDAMENTAL

3.1 Os Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), conhecidos em inglês por *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) ou *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPASs) (Figura 1), e popularmente chamados de *drones*, são aeronaves pilotadas remotamente a partir do solo, em sua maioria de pequenas dimensões e estrutura leve, com baixo custo operacional e de fácil operação (ANDERSON; GASTON, 2013; COLOMINA; MOLINA, 2014a). Estas características permitem que os VANTs realizem múltiplos sobrevoos, tornando estas aeronaves uma poderosa ferramenta nos estudos de sensoriamento remoto, combinando aquisições de alta resolução espacial com alta resolução temporal, a um custo reduzido (DANDOIS; ELLIS, 2013a; TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012a).

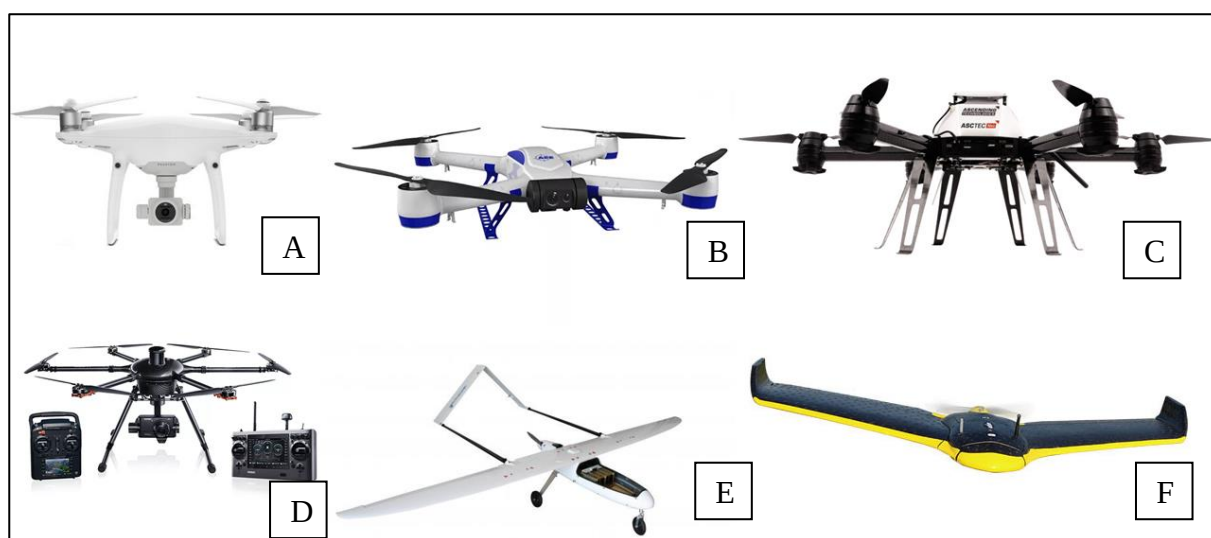


Figura 1. Diferentes modelos de VANTs utilizados em imageamentos e fotografias aéreas. Em “A” modelo *Phantom* da empresa DJI, em “B” VANT modelo AEE F100, “C” modelo ARCTEC, “D” modelo Yuneec Tornado H920, “E” modelo *Penguin B UAV platform*, “F” modelo *Ebee* da Sensefly (Fotos de divulgação das empresas)

Os primeiros VANTs foram utilizados em aplicações militares, e só recentemente o seu uso para captação de dados e informações está se difundindo para o uso civil, em estudos relacionados a agricultura, silvicultura, conservação da água, indústria do petróleo, observação meteorológica, controle de tráfego, e outros (Figura 1) (COLOMINA; MOLINA, 2014a;

GAGO et al., 2015; NEX; REMONDINO, 2013). A combinação de tecnologias do aeromodelismo recreativo e da indústria de aparelhos celulares trouxe melhoria e acessibilidade aos sistemas embarcados, com a miniaturização de Sistemas Globais de Navegação por Satélite - *Global Navigation Satellite System* (GNSS), barômetros, acelerômetros e giroscópios, e de potentes microprocessadores, além de melhorias significativas na capacidade de carga de baterias. Esta combinação reduziu significativamente o custo de produção dos VANTs utilizados atualmente no mercado (SIEBERT; TEIZER, 2014; TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012a).

Os VANTs, por possuírem capacidade de voar em alturas muito mais próximas ao solo, podem gerar imagens com resolução espacial muito mais refinada, podendo chegar a até centímetros (COLOMINA; MOLINA, 2014b). Uma adversidade que os VANTs possuem é a sua limitação quanto a cobertura espacial ampla, diferentemente dos sensores acoplados a satélites por exemplo. Outra limitação vem de sua falta de profissionais capacitados e operadores de sensores, por ser uma tecnologia nova e em desenvolvimento (COOK, 2017). Também há limitações no Brasil quanto a legislação brasileira da ANAC, que restringe os voos em áreas urbanas e com anuentes presentes em seus imageamentos.

Em contrapartida, há uma série de características positivas observadas no uso dos VANTs, como o fato de que, para o recobrimento de uma área, não há a necessidade de mudanças severas no ângulo de visada para obtenção de sobreposição de imagens e recobrimento de áreas, evitando assim distorções geométricas e conservando as propriedades radiométricas do sensor (ANDERSON; GASTON, 2013; JENSEN, 2009). Além disso, a resolução temporal dos demais sistemas sensores é limitada pela disponibilidade de voo das aeronaves ou de características da órbita dos satélites. Devido ao baixo custo do imageamento, o tempo de revisita por VANTs pode ser mais frequente, sendo ideal para estudos de vegetação (TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012). Para maximizar o potencial da tecnologia VANT para aplicações ambientais, é essencial que técnicas eficientes e precisas de correção e análise sejam desenvolvidas.

Segundo a Agencia Nacional de Aviação Civil - ANAC, 2017 a classificação de VANTs ou RPAS brasileira baseia-se em três classes:

- a) Classe 1: VANTs com peso maior que 150kg, certificadas pela ANAC com registro Aeronáutico Brasileiro (RAB) e para serem pilotadas, requisito de habilitação e licença

além do Certificado Médico Aeronáutico (CMA). Todos os voos realizados com esse tipo de equipamento deverão ser registrados.

- b) Classe 2: VANTs com peso entre 25 a 150kg, onde as aeronaves não precisam ser certificadas pela ANAC, porém com requisitos técnicos mínimos exigidos realizados pelos fabricantes. Pilotos com CMA além da licença e habilitação. Todos os voos devem ser registrados e aeronave deve ter registro no RAB.
- c) Classe 3: VANTs com peso menor ou igual a 25 kg, onde o requisito é que se a aeronave realizar voos a 12 metros acima do solo, deverá apenas serem cadastradas as informações quanto o operador e equipamento. Não há necessidade de CMA pelo piloto, nem mesmo o registro de todos os voos. As operações de drones de até 25 kg só poderão ocorrer a uma distância mínima de 30 metros de uma pessoa. A distância pode ser menor no caso de pessoas anuentes (aquelas que concordarem expressamente com a operação) ou de pessoas envolvidas na operação. Em áreas urbanas e aglomerados rurais, as operações serão de no máximo 60m metros acima do nível do solo.

A idade mínima exigida para os pilotos, segundo a ANAC é de 18 anos, e é exigido um seguro com cobertura de danos a terceiros para todas as classes propostas de VANTs.

As aplicações do imageamento por VANTs incluem usos nas áreas de documentação arqueológica, estudos e monitoramentos geológicos, monitoramento e modelagem para áreas urbanas, avaliação de áreas de riscos e emergências em eventos catastróficos naturais e antrópicos, dentre outros. Os produtos obtidos a partir dos imageamentos são nuvens de pontos tridimensionais, modelos poligonais, ortoimagens e modelos digitais de elevação, que podem ser utilizados no mapeamento, cálculo de volume, análise de deslocamento de massa, modelagem e gestão municipal, entre outros (CROMMELINCK et al., 2016; NEX; REMONDINO, 2013; REMONDINO et al., 2012).

3.2 Modelos digitais de elevação

O modelo digital de elevação (MDE), do inglês *Digital Elevation Model* (DEM), é uma representação digital e matemática de um objeto e seu ambiente, como ondulações de um terreno dentro de uma área selecionada (PAPARODITIS; POLIDORI, 2002). Este conceito está relacionado à elevação do terreno (Figura 2), mas também pode fazer referência a qualquer camada acima do solo, como o dossel da vegetação e construções antrópicas, como os edifícios e áreas urbanas (LIN, Z.ZHU, Q., GOLD, 2005; WILSON, 2012), bastando para isso que o modelo represente elevações acima de uma referência altimétrica pré-definida.

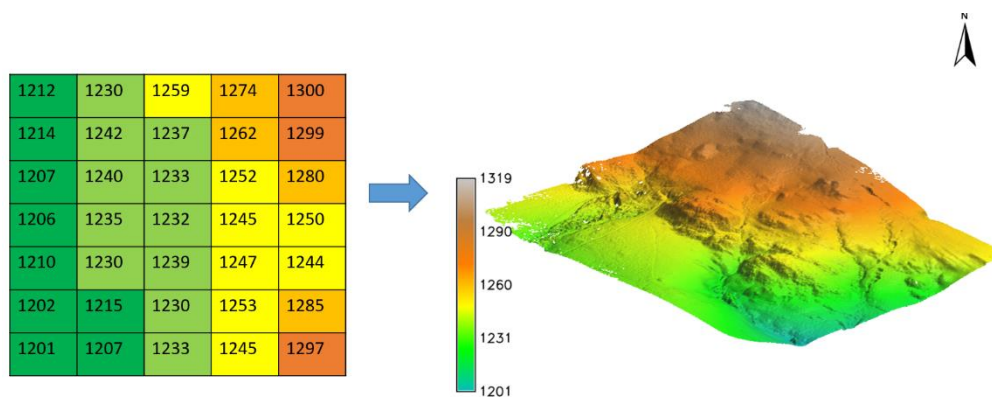


Figura 2. Modelo matricial com coordenadas X, Y e de altitudes em Z e um modelo digital de elevação em representação em 3D.

Os modelos digitais de elevação podem ser aplicados a mapeamentos, engenharia civil, engenharia de minas, geologia, geomorfologia, ordenamento do território, e nas áreas de comunicações (LI; ZHU; GOLD, 2005). Nas áreas ambientais, essa fonte de informação é utilizada para prevenção de incêndios florestais e poluição, na previsão das direções do vento, nas cartas de navegação marinha, entre outros. As informações morfométricas geradas pelos MDEs também são úteis para estudos nas áreas de agricultura de precisão (declividade e aspecto, por exemplo auxiliando na escolha do uso dos solos), estudos de risco de inundação nas bacias hidrográficas (na simulação das áreas inundáveis), e na climatologia, devido à diferentes influências da altitude no direcionamento dos ventos e da incidência solar em áreas de declives acentuados, auxiliando nos entendimentos ambientais (LI; ZHU; GOLD, 2005).

A construção destes modelos pode ser feita a partir da interpolação de pontos cotados e curvas de nível, sendo elas vindas de formatos *raster* ou vetorial (CHEN et al., 2016). As estruturas destes modelos são utilizadas para representação de superfícies, que podem ser em

redes irregulares triangulares ou em inglês *Triangulated Irregular Network* – TIN, ou feitas por interpolações aleatórias que gerem modelos em formato *raster* ou *grid* (LI; ZHU; GOLD, 2005; TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012a; WILSON, 2012). A grade regular é uma estrutura que se aproxima da superfície real através de um poliedro de faces retangulares ou matrizes de valores de elevação. A geração da grade depende diretamente do interpolador para precisão dos modelos gerados. A malha triangular é um conjunto de poliedros cujas faces são triângulos, e seus vértices são pontos amostrados da superfície, conectados pela triangulação de Delaunay e unidos pelos centros dos polígonos vizinhos (CAMARGO; DRUCK; CÂMARA, 2004; FELGUEIRAS, 1986; GROHMANN, 2004).

O nome “modelo digital de elevação” é utilizado como termo geral para se referir aos modelos matriciais contendo informação de elevação. Quando a informação é limitada à elevação do terreno, o Modelo é chamado de Modelo Digital de Terreno, ou em inglês *Digital Terrain Model* (DTM), e fornece informações sobre a elevação de qualquer ponto da terra ou da superfície da água (Figura 3). Quando a informação contém a maior elevação de cada ponto, levando em consideração os objetos sobre a superfície do terreno ou acima do solo, o MDE é chamado de Modelo Digital de Superfície, do inglês *Digital Surface Model* - DSM (FOREST; PARK, 2004; POPESCU; WYNNE; NELSON, 2003).

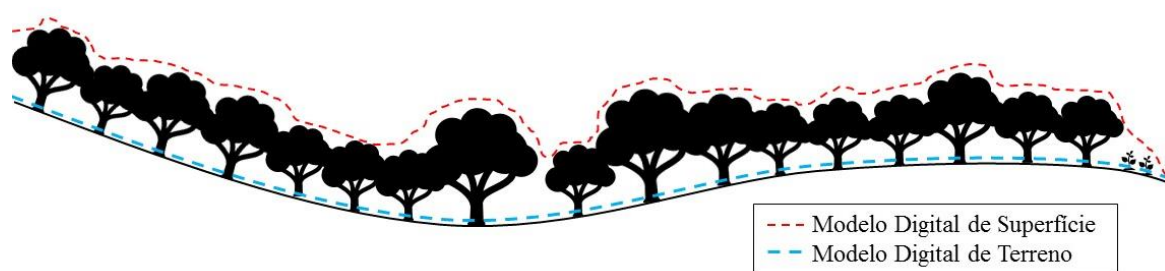


Figura 3. Representação do modelo digital de superfície e do modelo digital de terreno

Em áreas vegetadas, se subtrairmos o MDT do MDS, podemos gerar um modelo normalizado (plano) de altura do dossel, conhecido como modelo de altura de dossel (MAD) ou *Canopy Height Model* (CHM). Os MADs são medidas de alturas da vegetação comumente calculadas de dados derivados de sensoriamento remoto tridimensional. No início da aplicação dos modelos digitais de elevação, eram utilizadas medidas de vegetação calculadas através de estereoscopia e fotogrametrias múltiplas, aplicadas a imagens de satélites e ou aeronaves que

dispõem de sensores ativos de abertura sintéticas (SAR) (DANDOIS; ELLIS, 2010, 2013b). Atualmente estes dados são providos a partir de *LiDAR* devido a sua precisão e métodos de aquisição (ANDERSEN; MCGAUGHEY; REUTEBUCH, 2005). Esta métrica é utilizada para estimar biomassa e densidades de carbono, mudanças de biomassa, riscos de incêndio e contagem de vegetação individual em espécies (DANDOIS; ELLIS, 2013b; WALLACE; WATSON; LUCIEER, 2014).

3.3 O algoritmo *Structure-from-Motion* ou “estrutura a partir de movimento”

Os algoritmos de “estrutura a partir de movimento”, do inglês *Structure-from-Motion* (*SfM*), são métodos de reconstrução tridimensional em alta resolução, a partir da geração de uma nuvem de pontos (SNAVELY, 2011). As nuvens de pontos são um tipo de representação da superfície em três dimensões, com pontos em sistema de coordenadas em X, Y (latitude e longitude) e Z (altitude), que são comumente produzidas a partir de *scanners a laser* transportados por veículos aéreos sobre a superfície (NETELER; MITASOVA, 2008a). Os dados são usualmente disponibilizados em formato binário de uso público, conhecido como formato *.LAS* ou *.LAZ* (<http://www.lasformat.org/>).

O algoritmo *SfM* realiza a extração automática de pontos correlatos a partir de fotos individuais, identificando feições correspondentes entre as fotos e em seguida otimizando a localização tridimensional das feições correspondentes, segundo as câmeras e os parâmetros internos utilizados com o auxílio de algoritmos de ajuste (DANDOIS; ELLIS, 2013). Em especial, este algoritmo é capaz de extrair a informação de posição sem a necessidade preliminar de calibração precisa ou conhecimento prévio da ótica e geometria da câmera, sendo este o seu grande diferencial em relação à fotogrametria tradicional, uma vez que pode ser aplicado mesmo às fotografias tomadas por diferentes câmeras (SNAVELY, 2011).

Para a geração destas nuvens de pontos, o algoritmo faz uma busca entre as imagens que contenham uma grande sobreposição entre elas e encontra as suas correspondências. É verificado inicialmente em uma imagem padrão o sistema de projeção em que as fotografias de entrada se encontram, identificados pelos pontos correlatos de sobreposição das imagens (SCHONBERGER; FRAHM, 2016). Características como radiometria e geometria auxiliam o reconhecimento destas correlações nas diferentes fotografias aéreas utilizadas na geração da nuvem de pontos (SCHONBERGER; FRAUNDORFER; FRAHM, 2014). Existem várias

abordagens para a estrutura do movimento. No SfM incremental, as posições da câmera são resolvidas e adicionadas uma por uma à uma coleção. No SfM global, as posições de todas as câmeras são resolvidas ao mesmo tempo. Uma abordagem intermediária é o SfM fora do núcleo, onde várias reconstruções parciais são computadas e então integradas em uma solução global.

Para encontrar a correspondência entre as fotografias, recursos como informações de pontos de canto (borda) dos objetos ou diferenças de gradiente de direção dos objetos são identificados entre a primeira fotografia e a próxima com correspondência (LOWE, 2004). Um dos detectores de diferença de bordas mais amplamente utilizados é *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT). O SIFT é um software de visão computacional, que tem por objetivo realizar funções como a calibração da câmera, a reconstrução de objetos em 3D, o registro de imagens e reconhecimento de objetos (SHAPIRO; STOCKMAN, 2001). O SIFT utiliza a máxima diferença de uma pirâmide usando o *difference-of-Gaussians* (DOG), que é um algoritmo que elimina as feições borradas e usa as feições com melhores características. O primeiro passo no SIFT é encontrar uma direção de gradiente dominante. Para torná-lo rotativo-invariante, o descritor é girado para se ajustar a essa orientação. Outro detector de características comuns é o SURF (*Speeded Up Robust Features*) (BAY et al., 2008). No SURF, o DOG é substituído por uma matriz Hessiana. Além disso, ao invés de avaliar os histogramas de gradiente, o SURF calcula as somas de componentes de gradiente e as somas de seus valores absolutos. Os recursos detectados em todas as imagens serão combinados.

É possível que os algoritmos identifiquem correspondências incorretas, e por isso estas correspondências também devem ser filtradas. RANSAC (*Random Sample Consensus*) é um algoritmo normalmente usado para remover as correspondências de valores aberrantes. As trajetórias de características ao longo do tempo são usadas para reconstruir suas posições em 3D e o movimento da câmera. Uma alternativa é dada pelas chamadas abordagens diretas, onde a informação geométrica (estrutura 3D e movimento da câmera) é estimada diretamente das imagens, sem abstração intermediária para características ou cantos.

O SfM pode ser utilizado para a modelagem do terreno e da vegetação, com o auxílio de fotografias aéreas digitais (TONKIN et al., 2014; WESTOBY et al., 2012). A nuvem de pontos gerada pode ser utilizada como base para geração de um modelo digital de elevação (MDE), necessário para a ortorretificação das imagens adquiridas por VANTs. Os algoritmos

SfM estão fundamentados nos mesmos princípios básicos de estereoscopia utilizados na fotogrametria, propiciando informações de distância a partir da paralaxe observada em sobreposições de imagens adquiridas em série, e geram uma estrutura em três dimensões (JAVERNICK; BRASINGTON; CARUSO, 2014; TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012a; WESTOBY et al., 2012).

Os softwares mais utilizados para os processamentos de fotos na geração das nuvens de pontos são o software *PIX4D* (<https://pix4d.com/>) e *Agisoft Photoscan* (<http://www.agisoft.com/>). Estes softwares dispõem de interfaces amigáveis com o usuário, algoritmos de processamentos otimizados, e produzem dados de saída georreferenciados e interpretáveis pelos principais softwares de geoprocessamento. Existe também uma gama de softwares livres em operação e desenvolvimento, como o *Opendronemap* (<http://opendronemap.github.io/odm/>), acessível no github do seu projeto com informações e manuais de processamentos, o *Ecosynth* (<http://ecosynth.org/>), escrita em *python* e desenvolvido pelos pesquisadores Dandois e Ellis (2010) para realização de medições de vegetação em áreas com cobertura vegetal de grande porte, o *VisualSFM* (<http://ccwu.me/vSfM/>) sendo um aplicativo *Graphical User Interager* - GUI para reconstrução 3D usando a estrutura do movimento (*SfM*) assim como algumas rotinas criadas especificamente para MATLAB para processamento de algoritmo *Structure-from-Motion* e rotinas criadas no *python* para desenvolvimento de realidades em três dimensões.

3.4 Métodos de filtragem de dados tridimensionais de terreno

Os métodos de filtragem de nuvens de pontos descritos na literatura são focados principalmente em dados adquiridos através de imageamentos por *LiDAR*. Devido à grande quantidade de pontos obtidos no processo de imageamento, a filtragem é necessária para a identificação das feições do terreno, ou a geração de modelos que possam descrever a superfície do terreno em adição aos objetos que estão sobre a superfície (BROVELLI; LUCCA, 2012). As nuvens de pontos geradas por VANTs ou adquiridas por *LiDAR* são compostas de dados espaçados irregulares, dispostos em três dimensões. Os algoritmos de filtragem trabalham de duas formas: utilizando diretamente a nuvem de pontos original (sem transformações) ou métodos que realizam primeiramente a transformação da nuvem de pontos em formato *raster*, para posterior aplicação do processo de filtragem (SITHOLE; VOSSELMAN, 2004).

As metodologias para filtragem de dados de elevação levam em consideração três fatores: o terreno, que são as feições da superfície da terra sem os objetos ali existentes, como o solo nu ou as menores altitudes do terreno medidas na área local; os objetos de superfície que estão sobre o solo, como árvores, arbustos, construções, edificações; e a presença de erros (ruídos), que pode ser ocasionada por limitações ou problemas de detecção do sensor, ou presença de objetos dispersos na atmosfera (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010). A distinção entre o terreno e a superfície pode ser muito difícil, pois irá depender principalmente do tipo de objetos que recobrem o terreno e a variabilidade e a disposição destes na área imageada (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010).

Para a escolha do método de filtragem, leva-se em consideração as características físicas da região imageada. Por exemplo, as diferenças de elevação do terreno podem auxiliar o processo de filtragem ou dificultar o método. Em uma região onde o terreno real demonstra característica morfológica planar, a diferença de elevação entre os pontos vizinhos deverá ser pequena, com pouca diferença de valor de inclinação entre os pontos (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010). Se o filtro utilizado não levar em consideração a morfologia local, poderá associar um ruído a uma diferença de declividade local, ou um degrau, associando aquela feição erroneamente a um relevo escarpado ou declivoso (BROVELLI; LUCCA, 2012). Pontos de elevação com maior similaridade com sua vizinhança facilitam a filtragem, já pontos que representam uma diferença acentuada nos valores de elevação (degraus) dificultam a filtragem (SITHOLE, 2001; VOSSELMAN et al., 2004).

Os filtros baseados em declividade funcionam calculando a diferença de altura entre dois pontos, dentro de uma janela definida pelo usuário. Se a inclinação for acima de um certo limiar (parâmetro), o ponto mais alto é assumido como pertencente ao terreno (WANG et al., 2016). Para áreas com maiores declividades, são utilizados os filtros para seleção de solo (*ground-filter*). Estes filtros classificam os pontos da nuvem como de solo e não-solo, levando em consideração as condições ambientais locais, como a complexidade do terreno e a vegetação presente no local (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010). O algoritmo de classificação de curvatura multiescalar, ou em inglês *multiscale curvature algorithm (MCC-LiDAR)* (EVANS; HUDAK, 2007; HENGL; EVANS, 2009) é um algoritmo automatizado que identifica de forma interativa os objetos (*non-ground*) por pontos que excedem limiares curvatura positiva em todas as múltiplas escalas em nuvens de pontos, e é apropriado para regiões com vegetações baixas e relevos mais íngremes. Outro tipo de filtragem é baseado na diferença de elevação da superfície

do solo (*Ground Surface Elevation Difference*). Este tipo de filtragem leva em consideração que o solo tem poucas mudanças bruscas de superfície em áreas de terra nua, identificando os pontos de vizinhança com pequenas diferenças de elevação, e os pontos com maiores discrepâncias são assumidos como não-terrestres, e identificados como arbustos, árvores, e demais construções, como no caso do filtro baseado em declividade (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010; VOSSSELMAN, 2000).

As áreas de vegetação associadas a encostas são filtradas com base na premissa de que elas são significativamente mais elevadas do que suas vizinhanças. Esta suposição se anula quando o terreno é íngreme, e os pontos do terreno pode estar na mesma altura dos pontos de vegetação (SITHOLE; VOSSSELMAN, 2004). Assim, erros de filtragem podem ser mais aparentes em regiões de terrenos com maiores rugosidades. Nas áreas com vegetação baixa, como gramíneas e herbáceas, os erros ocorrem pela dificuldade de distinção em áreas de encostas íngremes (SITHOLE; VOSSSELMAN, 2004). Devido à baixa diferença de valores de elevação e declividade, os dados se tornam muito similares aos pontos encontrados em sua vizinhança, sendo associados erroneamente à superfície do solo. A utilização de parâmetros de filtragem que superestimem ou eliminem valores reais do terreno acarreta em um modelo digital de terreno com falhas, ou não-representativo (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010).

3.5 Interpolações de dados tridimensionais

Os modelos digitais de elevação são matrizes de valores de localização e elevação (x , y e z) que são gerados por um conjunto de funções matemáticas como representação da superfície do terreno (LI; ZHU; GOLD, 2005). Quando não se observa a informação suficiente para realização da superfície de forma contínua, é necessário recorrer a métodos matemáticos de estimação dos valores ausentes para a reconstrução da superfície contínua. A interpolação é uma técnica de estimação de valores de um atributo, em regiões com falta de informação ou informações não amostradas, a partir de dados com informações pontuais na mesma área ou região. A função matemática de interpolação que gera estas novas informações espaciais converte as informações pontuais em superfícies contínuas, levando em consideração as informações dos valores de atributos dos locais mais próximos a serem interpolados e a relação com as informações dos atributos dos pontos que se encontram mais afastados (CARVALHO; ASSAD; PINTO, 2012).

A reconstrução da superfície leva em consideração as informações de pontos de altitude, que por funções matemáticas estimam novos valores de elevação na região sem informação, para a reconstrução da superfície (PAPER et al., 2014). Os interpoladores espaciais são métodos usados também para prever dados físicos (meteorológicos, climáticos, fenomenológicos, concentrações químicas, níveis de ruído), e também usados para prever valores desconhecidos para quaisquer dados de pontos geográficos, em um domínio contínuo (LEE; WOLBERG; SHIN, 1997; MITASOVA; MITAS; HARMON, 2005; WISE, 2007).

Na construção dos modelos digitais de elevação, é indispensável a interpolação para a reconstrução dos modelos. A técnica de interpolação se utiliza, na obtenção dos valores das células de uma malha quadriculada ou uma malha triangular. Os métodos de interpolação, definidos por (BURROUGH, 1986) podem ser classificados da seguinte forma:

- a) Interpolação determinística que é baseada diretamente nos valores medidos na vizinhança, ou mesmo em fórmulas matemáticas aplicadas a estes mesmos valores.
- b) Interpolação probabilística ou de métodos geoestatísticos, expressam a intensidade e similaridade entre as amostras medidas e a distância e direção de seus valores calculados.
- c) Interpolação global que determina uma função que é aplicada em toda a região a ser interpolada;
- d) Interpolação local que aplica algoritmos de forma repetida em seus subconjuntos até o nível de conjunto ou de todos os pontos a serem interpolados;
- e) Interpolação de transição gradual ou abrupta que produz superfícies que variam de forma gradual ou abrupta;
- f) Interpolador exatos respeitam os valores da amostra sobre a qual o modelo é baseado, portanto, a superfície passa através de todos os pontos da amostra.
- g) Interpolador aproximado baseiam-se no fato de que, em muitas amostras, existem tendências globais, com variações suaves, e simultaneamente flutuações locais, que variam rapidamente.

As funções matemáticas que geram as interpolações mais utilizadas são:

- a) Média das altitudes das amostras vizinhas (determinístico, local de transição e aproximado); Triangulação de Delaunay e vizinho natural (determinístico, local, de transição abrupta e exato); realiza a criação da superfície usando o subconjunto mais próximo das amostras de entrada, usando pesos para interpolar novos valores.
- b) Superfície de tendência (probabilístico, global, de transição gradual e aproximado); um interpolador polinomial global, que através de amostra dos dados de entrada ele calcula os padrões da superfície e muda gradualmente seu cálculo polinomial para novos polinômios até conseguir estabelecer uma superfície continua com todos os dados apresentados.
- c) Superfície de mínima curvatura (*Spline*) (determinístico, local, de transição gradual e exato); estima valores utilizando funções matemáticas que minimizam a curvatura geral da superfície, como uma membrana lisa que passa exatamente pelos pontos de entrada.
- d) *Krigagem* (probabilístico, local, transição local e exato); calculada através de geoestatística onde a superfície gerada é estimada através de um conjunto de pontos com valores z . O cálculo é realizado levando em consideração o comportamento espacial dos valores z , realizando uma estimativa minuciosa de sua superfície a ser gerada.
- e) *Inverse Distance Weighted* – IDW (determinístico, local, exato); estima valores da célula calculando a média dos valores dos pontos de dados nos pontos de vizinhança das células presentes em seu processamento. Sua influência é o ponto mais próximo, sendo reconhecido como o centro da célula, que quanto maior a sua influência ou peso, mais ela terá valor dentro da média a ser calculada.

4. ÁREA DE ESTUDO

A Serra do Cipó é uma área pertencente ao Parque Nacional da Serra do Cipó (PNSC), uma Unidade de Conservação importante por estar localizada a aproximadamente 100 km ao norte de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais, atraindo um grande número de turistas e pesquisadores, principalmente no que tange a conservação da área (FELIPPE et al., 2012). O PNSC é circundado pela Área de Proteção Ambiental (APA) “Morro da Pedreira”.

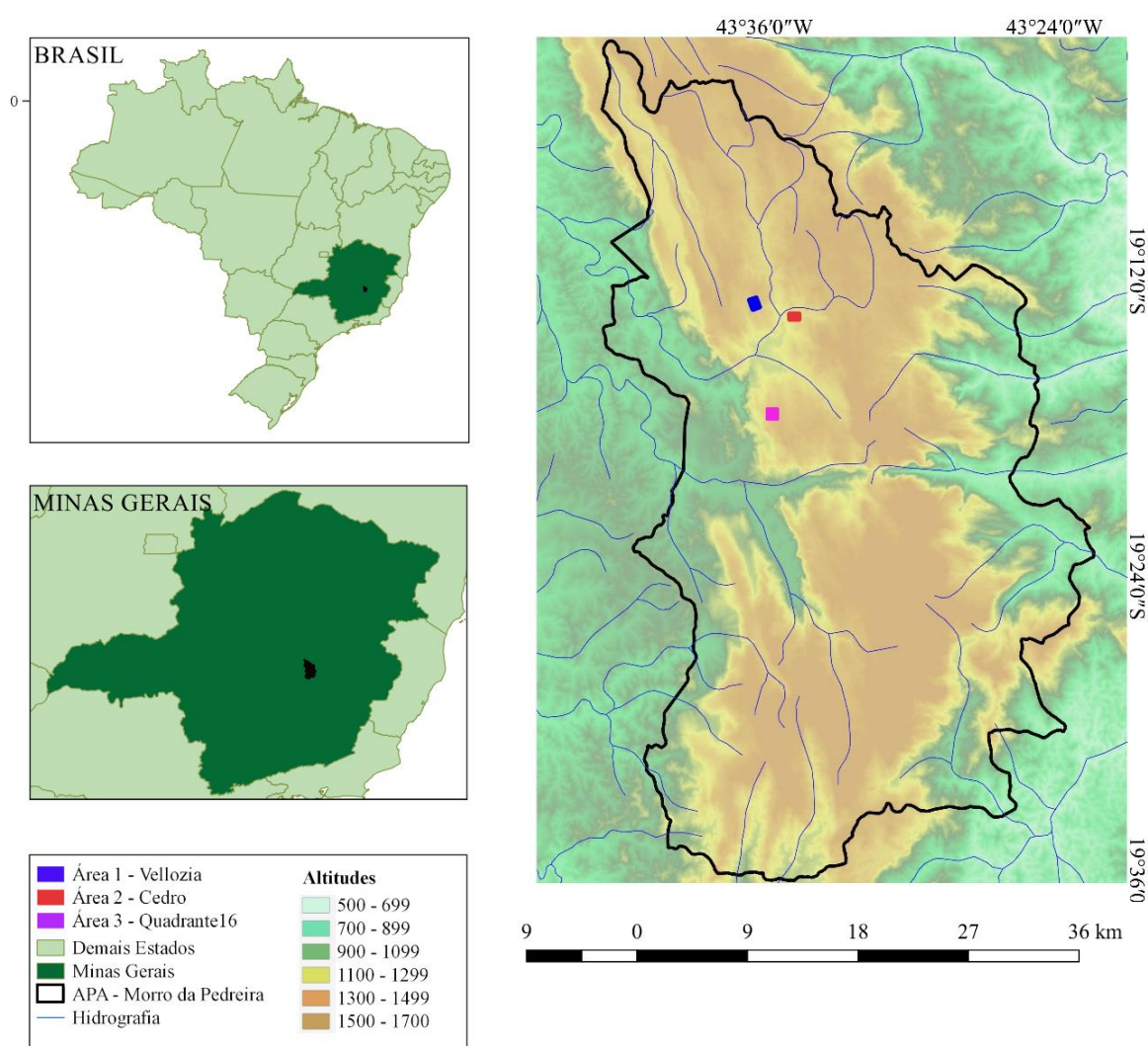


Figura 4 - Localização da área de estudo. A esquerda, o mapa do Brasil no canto superior e a localização do estado de Minas gerais e o posicionamento da Serra do Cipó, na figura abaixo a delimitação da Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira com um modelo digital de elevação derivado do *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM. A localização das três áreas imageadas para o presente estudo (Vellozia, Cedro, Quadrante 16) está indicada na figura principal.

A Serra Geral, da qual faz parte a Serra do Cipó, é constituída pelo conjunto orográfico da Cadeia do Espinhaço, delimitada por vários topônimos locais como a Serra Talhada, o Morro do Breu, a Lapinha da Serra, a Serra do Salitreiro, o Alto Palácio, a Serra da Farofa, a Serra da Bandeirinha, o Travessão, a Serra da Mutuca, a Serra da Lagoa Dourada e o Morro da Pedreira. Apresenta uma diversidade de elevações, variando entre 800m e 1800m, pertencendo ao Escudo Cristalino Brasileiro e definindo em grande parte a hidrografia local. Devido à matriz geológica dominante no sistema e às perdas por lixiviação, os solos caracterizam-se pela acidez, pobreza de nutrientes e riqueza de alumínio trocável (VALENTE, 2009). Devido à resistência à pedogênese, os solos são rasos e arenosos, classificados como Neossolos Litólicos, jovens e pouco desenvolvidos, presentes em relevos muito acidentados de morrarias e serras (IBGE, 2007).

A região específica da Serra do Cipó é formada pelas sequências do Supergrupo Espinhaço, por uma frente de empurrão sobreposta entre o Grupo Macaúbas e o Grupo Bambuí. Sua escarpa tem um caráter morfotectônico, escarpado com presença de quartzitos e metalitos (SAADI, 1995). Devido à característica de escarpas paralelas, os cursos d'água apresentam padrão hidrográfico em paralelismo, e as menores drenagens, localizadas nas extremidades sul das escarpas, possuem características de maiores quedas d'água e cachoeiras (FELIPPE et al., 2012; SAADI, 1995). A Serra é delimitada pelo Rio Cipó e seus afluentes a leste (GONTIJO, 2008). A Serra do Cipó encontra-se na faixa de clima subtropical quente, denominado mesotérmico brando e semiúmido, com microclimas diversos, relacionados aos fatores topográficos (GIULIETTI et al., 1987; MENEZES; MEGURO, 2015).

A temperatura média anual está em torno de 18 a 20°C no verão e médias abaixo de 15° no inverno. A precipitação anual é baixa entre maio e setembro, variando entre 850 até 1.400 mm, porém as temperaturas amenas decorrentes das altitudes proporcionam neblina durante todo o inverno, do Norte para o Sul da serra (GONTIJO, 2008; SANTOS; SERAFIM; SANO, 2011). Nas áreas com maiores altitudes, o volume de chuvas é maior do que nas áreas de menores elevações. A orografia da Cadeia do Espinhaço influencia a formação de chuvas em microescalas, devido às barreiras naturais que auxiliam na ascensão de ar mais úmidos para maiores altitudes (SOBREIRO; SILVA; STREHER, 2015).

A vegetação na Cadeia do Espinhaço é composta por diversos grupos distintos de plantas, e estima-se que sua flora inclua mais de 4000 espécies (RAPINI et al., 2008; TAI,

2012). Na região da área de estudo, tem-se uma transição entre os biomas do Cerrado e Mata Atlântica, ao longo dos gradientes topográficos, edáficos e climáticos, conferindo à região uma elevada riqueza de espécies, endemismos, e grande individualidade fitofisionômica (GIULIETTI et al., 1987; MEGURO et al., 1996). O Campo Rupestre é um tipo vegetacional que se encontra nas áreas mais altas da Cadeia do Espinhaço, feição geomorfológica pertencente ao Planalto Brasileiro (GIULIETTI et al., 1987; GONTIJO, 2008; MEGURO et al., 1996; RAPINI et al., 2008). Este tipo de vegetações são encontradas em altitudes acima de 800 metros dentro do domínio do Cerrado (AB'SABER, 2007), como as encontradas na região da Serra do Cipó - MG. Esta vegetação tem formações mais abertas nas partes mais elevadas das Serras do Planalto Central Brasileiro, recobrando regiões de rochas metamórficas com substrato quartzítico (PIRANI et al., 2015). Acredita-se que os principais condicionantes ambientais da flora nestes sistemas estejam relacionados ao clima, à geologia e à geomorfologia, além das interações bióticas e das alterações antrópicas sobre estes fatores (RAPINI et al., 2008).

O campo rupestre tem características ecossistêmicas próprias e ocupa trechos de afloramentos rochosos, ainda não plenamente entendidas quanto à sua relação com diferentes fatores ambientais (GIULIETTI et al., 1987; MEGURO et al., 1996; RAPINI et al., 2008; VALENTE, 2009). São vegetações distribuídas em paisagens de micro-relevos, levando à distribuição heterogênea das espécies, caracterizados por uma riqueza de espécies herbáceas endêmicas, e composições de espécies únicas (FERNANDES, 2016). Suas diferentes fitofisionomias englobam os campos de altitude, os campos serranos, os campos quartzíticos, e os complexos rupestres de altitude sobre rocha quartzítica (figura 8) (BENITES et al., 2007; GIULIETTI et al., 1987; MEGURO et al., 1996; PIRANI et al., 2015; RAPINI et al., 2008). Esta fisionomia é composta por pequenos arbustos e arvoretas pouco desenvolvidas, com média de dois metros de altura, e dominado pela presença de gramíneas e herbáceas ao longo do seu gradiente altitudinal (FERNANDES, 2016; RAPINI et al., 2008; RESENDE; GUIMARÃES, 2007; SILVEIRA et al., 2016; TAI, 2012).

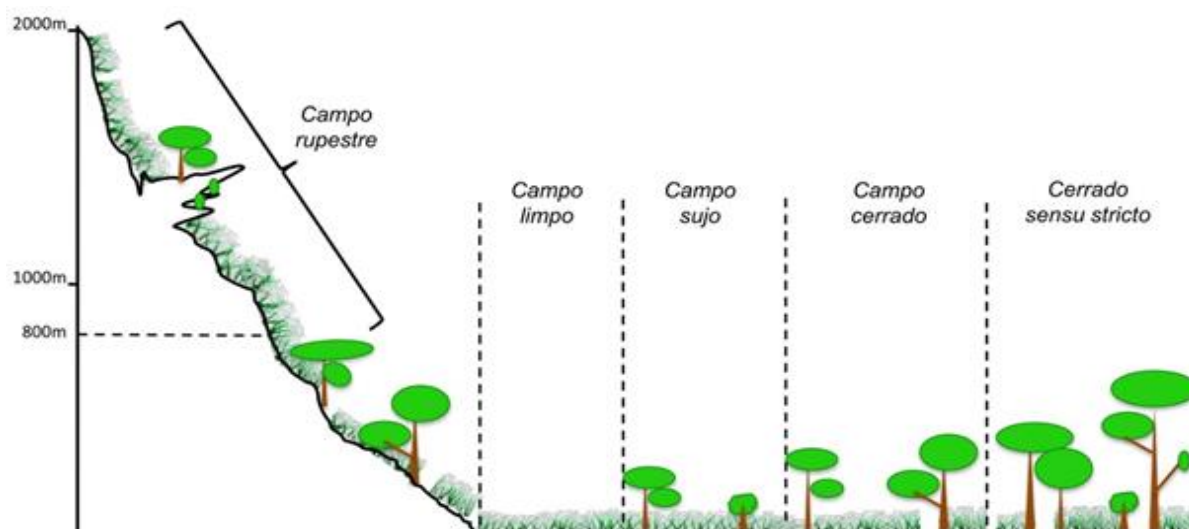


Figura 5 - Distribuição da vegetação de Cerrado e do Campos Rupestres em um perfil altitudinal (LE STRADIC, 2012).

Nas áreas mais altas das vertentes se localizam os campos rupestres, geralmente acima dos 900 metros de altitude, com presença de vegetação herbácea e de pequenos arbustos sempre verdes (GIULIETTI et al., 1987). Em uma escala regional, a vegetação de campos rupestres é formada por um rico mosaico de comunidades, sob controle do relevo local, da natureza do substrato, e do microclima (GIULIETTI et al., 1987; GONTIJO, 2008; MEGURO et al., 1996). As fitofisionomias predominantes compartmentadas principalmente pela grande diversidade topográfica e altitudinal são campo limpo, campo brejoso, cerrado, cerradão, mata ciliar e mata de encosta (GIULIETTI et al., 1987; PIRANI et al., 2015).

5. MÉTODOS

Para a realização do presente trabalho, foram seguidas as seguintes etapas: seleção das áreas imageadas; voos de aquisição das imagens; geração de nuvem de pontos através do algoritmo *Structure from Motion*; filtragens a partir da nuvem de pontos e a partir do *raster* (DEM); geração do MDS por interpolação; interpolação dos dados filtrados e geração dos modelos digitais de terreno; coleta de pontos de campo para validação dos modelos gerados; avaliação e validação dos dados gerados (Figura 6). As etapas estão explicadas nas subseções a seguir.

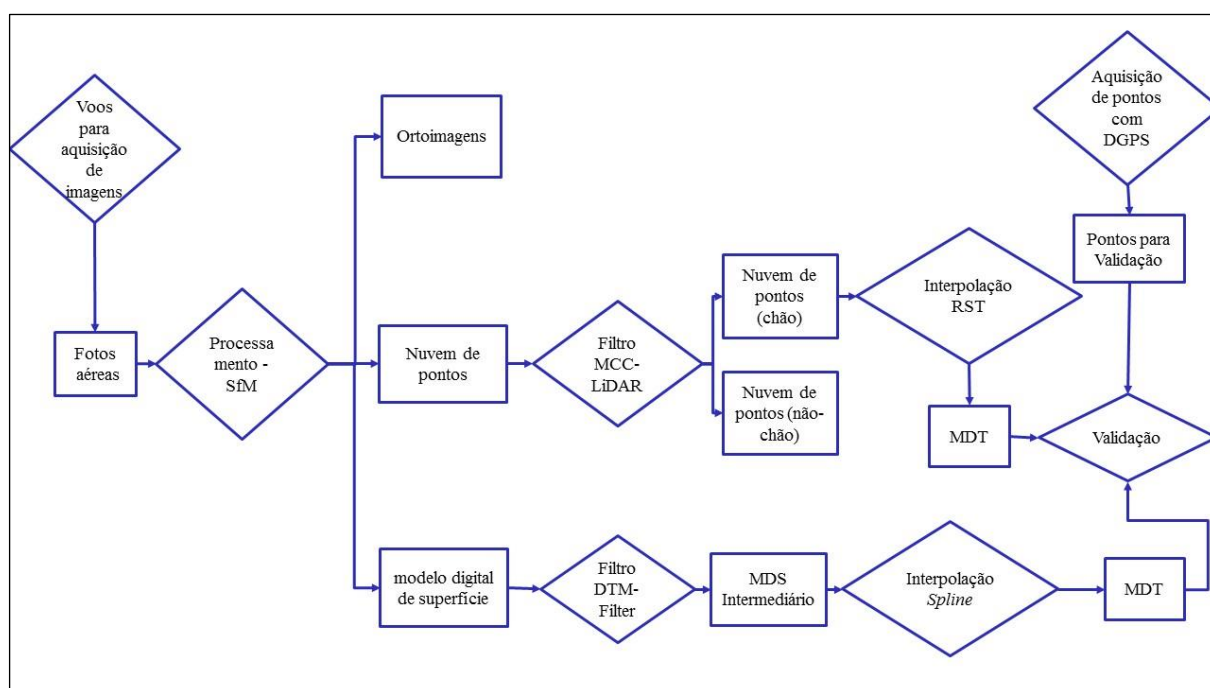


Figura 6 -. Sequência dos procedimentos metodológicos realizados nesta dissertação

5.1 Seleção das áreas de estudo:

As áreas de estudo foram selecionadas segundo o desenho experimental do projeto “*e-phenology: combining new technologies to monitor phenology from leaves to ecosystems*” (FAPESP 2013/50155-0), que explora soluções inovadoras para monitoramento de vegetação nos trópicos, combinando a investigação em ciências da computação, fenologia e ecologia, coordenado pela Dra. Leonor Patrícia Cerdeira Morellato (IB/UNESP), Dr. Ricardo Torres (ICMC/UNICAMP), e Dr. Thiago Sanna Freire Silva (IGCE/UNESP). O projeto tem monitorado cinco áreas distintas localizadas na região da Serra do Cipó (MG), distribuídas em um gradiente altitudinal variando entre 977 m e 1420 m.

Para a avaliação dos métodos de geração de modelos digitais de terreno, foram selecionadas três diferentes áreas neste trabalho, representando diferentes condições topográficas e de vegetação. A primeira área selecionada, nomeada de área “*Vellozia*” ou Área 1 é uma região com dimensões de 594 por 789 metros, e 50 hectares. Dentro desta área sobrevoada encontra-se uma extensa área de vegetação gramínea e herbácea, com espécies endêmicas de campo rupestre - como no caso do gênero *Vellozia*, com uma topografia variando entre 1212 e 1306 metros de altitude, e com uma porção à leste de afloramentos rochosos com arbustos em seus entremeios. Também é notável a presença de uma mata de galeria, próxima a um rio que circunda a área.

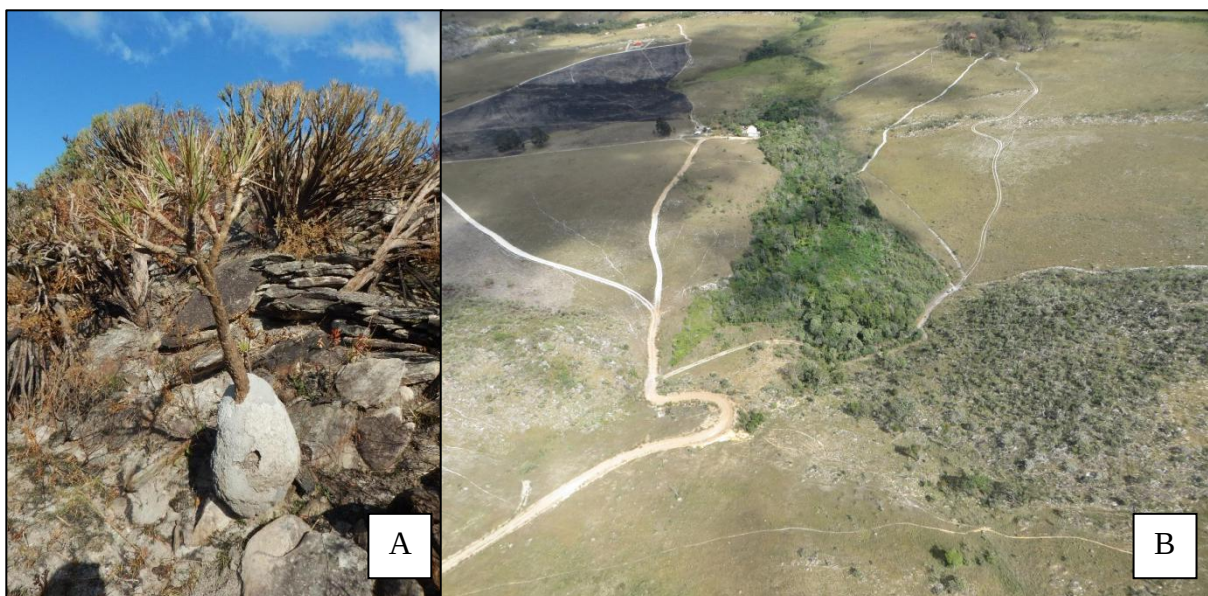


Figura 7 - Na fotografia “A” exemplo de uma vegetação típica do gênero *Vellozia* e em “B” foto aérea oblíqua mostrando área com vegetação de gramíneas, campos pedregosos e ao centro da imagem, vegetação de mata ciliar.

A Área 2 ou área “Cedro”, tem 815 por 815 metros de extensão ou 66,5 hectares de área recoberta pelos voos, e contém diferentes tipos de vegetação de campos rupestres, como por exemplo a presença de micro-habitats que se encontram entre os afloramentos rochosos imersos em uma matriz de gramados arenosos e pedregosos. Esta área tem uma elevação menor do que as demais áreas sobrevoadas, com variação de suas altitudes de 1058 a 1138 metros. Esta área também conta com a presença do Rio Cipó como parte da área imageada, implicando na presença de matas de galerias, porém menos expressivas do que em relação à Área 1.

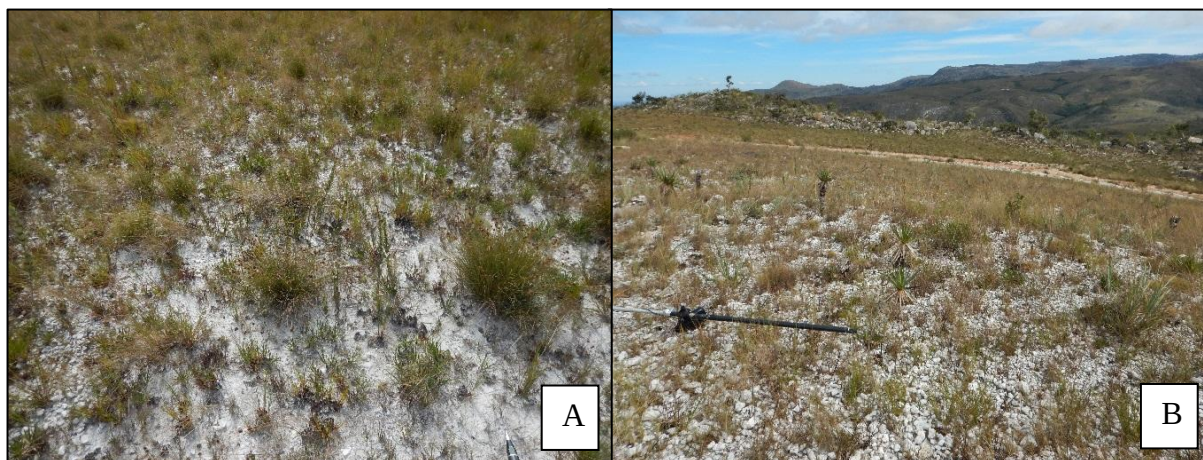


Figura 9. Na fotografia “A” exemplo de uma vegetação de Campo arenoso na área 2 ou no Cedro, e em “B” uma foto de Campo Pedregoso.

A Área 3 ou “Quadrante 16” tem perímetro de 800m por 800m ou 64 hectares, inclui uma topografia com maiores altitudes em relação às três áreas, variando entre 1170 e 1352 metros de altitude na região sobrevoada. Tem vegetação predominante contendo alguns arbustos e herbáceas dispersos pelo terreno, bem como a presença de gramíneas em campos rochosos e arenosos.

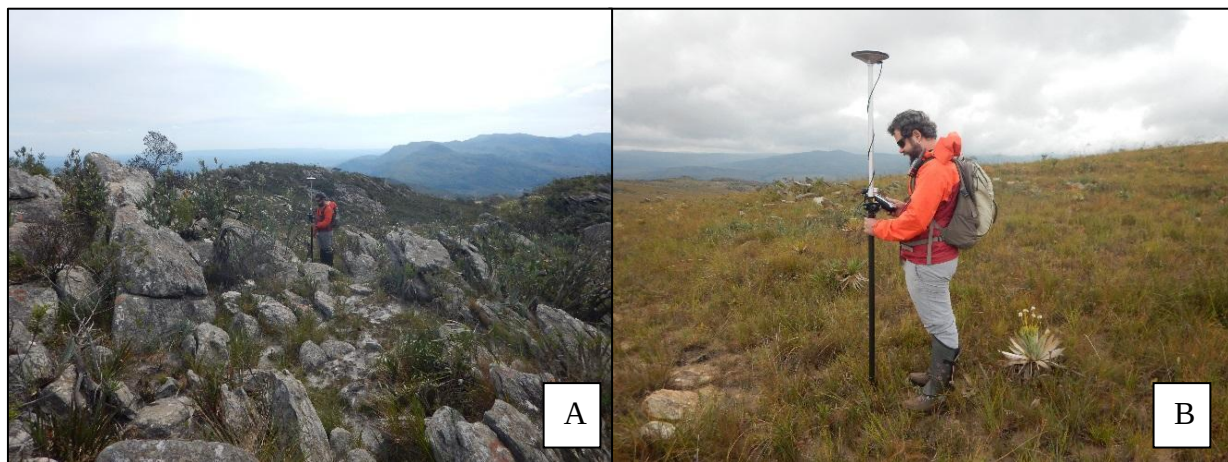


Figura 10. Fotografia “A” mostrando os micro-habitats entremeados em afloramentos rochosos, e fotografia “B” mostrando área aberta de gramíneas presentes na área 3.

5.3 Aquisição das imagens

A aquisição das fotografias aéreas digitais foi realizada a partir do uso de um VANT de asa fixa, com envergadura de asa de 1,88 m e 3kg de peso total, modelo *G-Plane*, fabricado pela empresa *GDrones* (www.g-drones.com.br). A aeronave é equipada com uma placa controladora *Pixhawk*, baseada em software e hardware abertos, equipada com um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para controle de posicionamento geográfico do UAV, e um magnetômetro para determinação de direção, permitindo que o VANT possa realizar missões autônomas através de pontos predefinidos (CLAPUYT; VANACKER; OOST, 2016; PETRAS et al., 2016). O software de controle comporta decolagem e pouso automáticos, mas devido à rugosidade do terreno e frequência de ventos fortes na região de estudo, estas etapas da operação foram realizadas por um piloto experiente, evitando acidentes.



Figura 11. VANT utilizado na aquisição das imagens, modelo *G-Plane*

A carga útil (*payload*) inclui uma câmera Canon PowerShot SX260, contendo um sensor RGB de 4000 x 3000 pixels (6,19 x 4,64 mm) e uma distância focal de 4,5 mm. A missão de voo foi programada para fornecer sobreposição frontal e lateral de 80% ou mais entre as fotografias. O tempo de voo para cada área imageada foi de aproximadamente 20 minutos cada.

O imageamento foi realizado entre 20 e 22 de junho em 2016, simultaneamente à coleta de pontos de controle terrestre. As fotografias aéreas foram obtidas por meio de missões autônomas de imageamento, usando o código aberto do software Mission Planner (<http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>).

O software Mission Planner possui *link* de comunicação com o sistema de piloto automático da aeronave, automatizando o planejamento do voo e a sua execução. A partir das informações da câmera (distância focal e resolução do sensor) e informações sobre a geometria de aquisição (altura de voo acima do solo, porcentagem de sobreposição longitudinal e lateral, e direção de imageamento), o software cria automaticamente as linhas de voo, calcula a velocidade de voo necessária e a frequência necessária de disparo da câmera para obtenção dos resultados especificados, além de determinar a resolução espacial final das imagens. Com o auxílio da telemetria, o controle da aeronave é feito de forma automática, sem a necessidade de controle por um piloto em solo. Contudo, para fins de segurança, o operador de solo é responsável pela decolagem e pouso da aeronave, e detém a capacidade de assumir o controle manual a qualquer momento, em caso de falha do piloto automático.

As missões de imageamento foram delimitadas para as diferentes regiões, requerendo entre 11 e 13 linhas de voo para recobrimento total, a uma altura de voo de 120 a 150 metros acima do solo. Durante o levantamento, foram adquiridas 439 imagens da área 1, 498 imagens da área 2, e 574 imagens da área 3. Cada área amostral foi calculada para imageamento de uma área de 800m x 800m (64 ha), porem por divergência de datas e condições de voo essa área pode variar de acordo com seu imageamento.



Figura 12. Linhas de voo pré-definidas com auxílio do software *Mission Planner*, relativas às áreas 1 (A), área 2 (B) e área 3 (C). Imagem de fundo: *Google Earth*TM.

5.4 Geração das nuvens de pontos

Para a geração das nuvens de pontos, foi utilizado o algoritmo *SfM – Structure from Motion*, implementado no software *Pix4D Mapper* (<https://www.pix4d.com/>, WESTOBY et al., 2012). O algoritmo faz o alinhamento automático das fotografias aéreas sobrepostas, gerando a calibração entre as imagens e posterior extração da nuvem de pontos (TURNER; LUCIEER; WATSON, 2012a). Os pontos foram extraídos por correspondências de região, o que gerou uma nuvem de pontos densificada através das triangulações e correspondências entre as imagens calibradas.

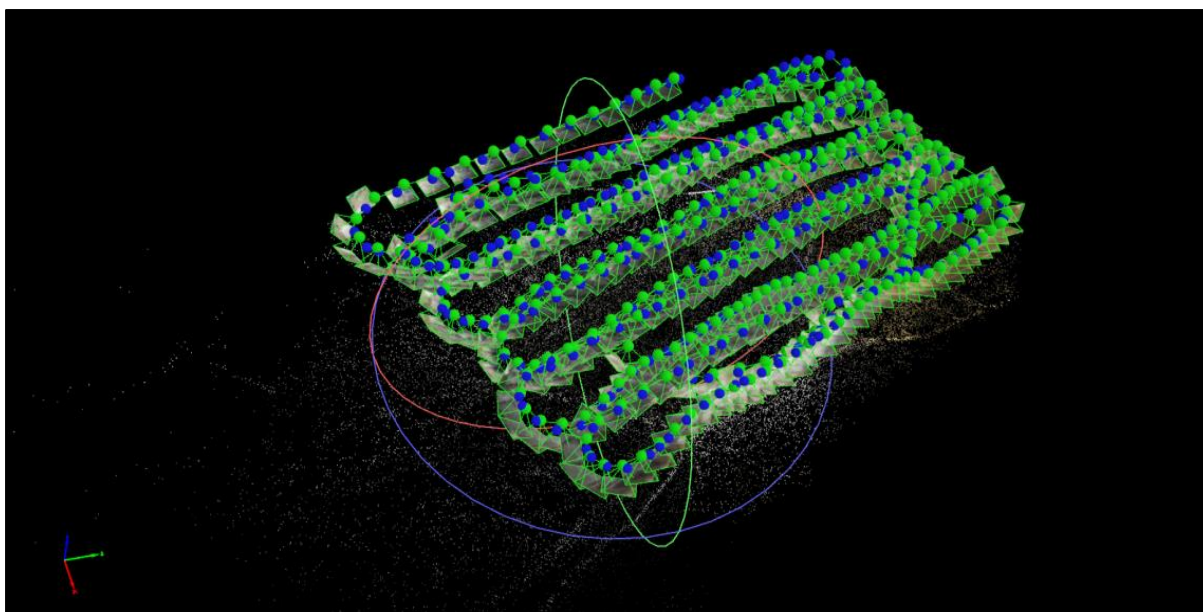


Figura 13. Vista superior do resultado de imageamento da Área 1. As fotografias aéreas com os pontos em verde são as localizações centrais de cada fotografia registradas pelo GPS no momento de sua tomada, e os pontos azuis indicam a estimativa de posição por auto-ajuste realizada através do algoritmo *Structure-from-motion*, implementado no software PIX4D Mapper 3.1.2.

O algoritmo seleciona as fotos que são utilizados para geração da nuvem de pontos, removendo aquelas são geradas durante a decolagem e pouso, além de fotografias excessivamente oblíquas tomadas durante as transições entre linhas de voo, que não podem ser usadas devido às falhas no recobrimento e geometrias de aquisição extremas.

Com base nas posições estimadas para a câmera, o software *PIX4D* calcula as informações de profundidade das fotografias, recombina-as em uma única nuvem de pontos. Foi utilizado o nível de qualidade médio para a geração dos pontos, pois quanto maior a qualidade, maior o número de pontos gerados no processo de densificação das nuvens, e maior

tempo e uso de recursos computacionais durante os processos de filtragem. Para a escolha do tipo de parâmetro de profundidade, foi utilizado o parâmetro agressivo, que leva em consideração a reconstrução geométrica da cena complexa com inúmeros pequenos detalhes sobre o plano, definindo a sua profundidade. O software nesse processo também faz uma filtragem prévia dos pontos evitando duplicidade dos dados, levando em consideração os modos de filtragens segundo a característica do terreno que foi gerado a nuvem de pontos, a profundidade e a densidade de nuvem desejada. Uma malha poligonal foi gerada, através de triangulações, assim como um MDS prévio, que servem para verificação da base de dados criada. A malha auxilia na organização e disposição final da nuvem de pontos de forma arbitrária. As faces criadas por esta malha de polígonos predefinido auxiliaram na criação da nuvem de pontos densificadas. A interpolação dos dados nesta etapa auxiliou o software a construir as geometrias.

O modelo digital de superfície gerado foi gerado pelo processamento do software *PIX4Dmapper Pro*, definindo-se uma resolução espacial de aproximadamente 5 cm por pixel. Durante a geração dos modelos digitais de superfície, foram utilizados parâmetros para diminuição de redundâncias e interferências nos modelos gerados, como os filtros de ruído (*Noise Filter*) e o filtro de suavização da superfície (*Surface Smoothing*). O interpolador aplicado nesta operação, o Inverso da Distância ou IDW (*Inverse Distance Weighting*), teve tempo de processamento médio para cada geração de modelo de aproximadamente duas horas com computação robusta (com uma demanda de processamento de aproximadamente 48 horas, 64 GB de memória RAM, processador Intel® Core™ I7-5820K CPU 3,30GHZ, placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 970 de 4 GB, e sistema de armazenamento de dados composto por duas unidades SSD operando em paralelo).

Na criação das nuvens de pontos, a densificação foi feita com as resoluções espaciais das imagens em seu tamanho original, com 4 combinações mínimas por pontos. O número de pontos gerados na nuvem de pontos densificada foi de aproximadamente 100 milhões de pontos, com densidade média de 73 pontos por metro cúbico. Os dados foram exportados nos formatos *.las* e *.xyz* como opção para diferentes entradas em softwares distintos. O tamanho da janela utilizada no processamento das imagens foi de 7x7, e foi utilizado uma pré-filtragem do próprio software PIX4D de processamento de áreas, com remoção de *outliers* e objetos mínimos. O MDS construído pelo PIX4D teve resolução de 4,907 cm/pixel, após as filtragens de suavização da superfície e filtragem de ruído.

5.5 Filtragem das nuvens de pontos e modelos de superfície

As filtrações do MDS para geração de um MDT podem ser feitas de duas formas no geral, uma transformando a nuvem de pontos em um *raster* ou *grid* e filtrando o *raster* posteriormente à sua geração, ou através da filtração direta da nuvem de pontos densificada, gerando a superfície posteriormente por interpolação dos pontos de terreno. Em ambos os casos, o processo consiste em classificar, automaticamente os pontos ou células em classes de terreno e classes de superfície (MENG; CURRIT; ZHAO, 2010; VOSSELMAN et al., 2004).

5.5.1. Filtragem a partir de dados *raster*

O modelo digital de superfície utilizado foi o gerado durante o processamento dos produtos pelo software *PIX4Dmapper Pro*, com resolução espacial de 5 centímetros. O MDS foi submetido ao processo de filtração pelo algoritmo “*DTMfilter*”, implementado no software SAGA-GIS (VOSSELMAN, 2000). Este algoritmo identifica, para todas as células do MDS, quais pares de células possuem diferenças de altura acima de um desnível máximo definido pelo usuário, considerando que esta diferença possa ser considerada como “ruído”. O filtro se baseia em uma janela (*kernel*) cujo raio é definido pela diferença de altura máxima especificada como aceitável entre duas células. A célula central da janela é representada como a superfície do terreno, e caso não haja, dentro do raio de busca, pixels com diferenças de altura maiores do que o desnível máximo definido, o algoritmo prossegue em direção ao pixel seguinte. Qualquer característica dos pixels usados na filtração maiores que o limiar definido, não pertencerá à superfície natural do terreno (SITHOLE, 2001).

Desta forma, são excluídas as células que não pertencem ao terreno (*non-ground*) e os espaços gerados pela remoção dos pixels de ruído precisam então ser interpolados para gerar o modelo digital de terreno. Para esta interpolação, foi utilizado o algoritmo *multilevel B-spline* (LEE; WOLBERG; SHIN, 1997), que interpola os pontos mais dispersos, de forma remanescente, utilizando uma hierarquia de redes de controle, usando células principais aplicando a interpolação para áreas mais grossas ou mais esparsas até realizar a interpolação para áreas com mais pontos ou mais finas, aplicando para esta sequência uma potência de funções *bi-cúbicas* (SITHOLE; VOSSELMAN, 2005). O algoritmo faz uso de uma hierarquia de redes de controle grosso a fino para gerar uma sequência de funções *B-spline bicúbicas*, cuja

soma se aproxima da função de interpolação desejada. Grandes ganhos de desempenho são realizados usando o refinamento *B-spline* para reduzir a soma dessas funções em uma função *B-spline* equivalente.

Foram testados diferentes parâmetros para o processo de filtragem, e os valores ótimos determinados foram de um raio de janela de 50 células e um desnível de altura ou declividade média de 15 por cento. A definição do melhor raio levou em consideração a variabilidade da altura da vegetação em algumas regiões da imagem.

5.5.2 Filtragem a partir da nuvem de pontos:

O segundo método aplicado se baseia na filtragem direta da nuvem de pontos. Para este fim, foi utilizado o algoritmo *Mcc-LiDAR*, que identifica automaticamente objetos e formas a partir de nuvens de pontos não-classificadas (EVANS; HUDAK, 2007). Este algoritmo foi desenvolvido para filtrações de dados provenientes de *LiDAR*, e neste estudo foi usado para filtragem das nuvens de pontos geradas pelos algoritmos *SfM*. A escolha deste filtro se baseou principalmente no fato do mesmo apresentar uma boa performance para filtrações em áreas vegetadas e/ou com terrenos complexos, dois requisitos importantes para a filtragem de diferenciação de pontos de chão e pontos de não chão (SITHOLE; VOSSELMAN, 2004). O algoritmo classifica os dados como pontos de solo ou chão (*ground*) e demais pontos (*non-ground*) fornecendo um arquivo classificado de que se chamam “terra nua” ou *bare earth*. Para conseguir identificar o parâmetro ideal da escala, usa-se a seguinte função:

$$(1) \quad c = x(s) + t$$

Este algoritmo utiliza dois parâmetros que o usuário deve definir: sendo 's' o parâmetro de escala e 't' o limiar de curvatura. O 'x' descreve a elevação do vetor $Z(s)$, calculando o valor da curvatura 'c'. Os pontos da nuvem então são classificados como objetos e removidos, se cumprirem a condições de que $Z(s) > c$.

O modelo é gerado de forma automatizada, isto é, o usuário não intervém durante o processo de filtragem. O algoritmo foi projetado para identificar repetidamente, de forma objetiva e confiável, os pontos de chão com o mínimo de necessidade de pós-processamento manual, a partir de qualquer nuvem de pontos adquirida ao longo de um ambiente vegetado (EVANS; HUDAK, 2007; MENG; CURRIT; ZHAO, 2010).

Uma versão de desenvolvimento do software *GRASS GIS 7.3 svn de modo desenvolvedor* (*Geographic Resources Analysis Support System*, <https://grass.osgeo.org/>) foi utilizada para fazer a filtragem da nuvem de pontos. Este é um software de geoprocessamento de código aberto, que contém módulos programáveis de processamento de dados para formatos *raster* e vetoriais, e tem ligação entre outros sistemas como os de bancos de dados (GROHMANN; STEINER, 2008; NETELER; MITASOVA, 2008b). A versão de desenvolvimento foi utilizada uma vez que a versão estável mais recente ainda não possuía o algoritmo *Mcc-LiDAR* implementado.

Para facilitar o processamento, as nuvens de pontos foram separadas em segmentos ou *tiles*, em 17 partes diferentes. Para cada segmento, os dados foram importados utilizando o módulo “*v.in.lidar*”, que importa a nuvem de pontos em um formato vetorial, utilizando a biblioteca *liblas* (<http://www.liblas.org/>) para leitura de dados em formato *.las* (ASPRS, 2008). Para esta importação, foi atribuído o parâmetro *-tr*, que evita a criação das tabelas de atributos e importa os dados limitados à região pré-definida pelo usuário do GRASS GIS. O algoritmo *Mcc-lidar* utilizado faz parte do módulo *v.lidar.mcc*, por ser considerado mais robusto em suas funcionalidades que do que quando utilizado separadamente (PETRAS et al., 2016). Os parâmetros finais utilizados para gerar a filtragem foram escala (*s*) de 10 e limiar de curvatura (*t*) de 0.3, escolhidos após testarmos iterativamente diferentes combinações para determinar os melhores parâmetros de escala e curvatura.

Após o processo de filtragem, a interpolação dos dados foi realizada através do algoritmo *v.surf.rst*, que interpola uma superfície em formato *raster* utilizando o método *spline*, regularizado com tensão, realizando uma aproximação espacial baseada nos valores de *Z* (MITASOVA; MITAS; HARMON, 2005; NETELER; MITASOVA, 2008b). O produto de saída deste algoritmo é um modelo digital de elevação que representa uma superfície aproximada, similar a uma membrana que recobre a superfície, e seus parâmetros controlam os dados de superfície e o ruído, preservando as propriedades geométricas da superfície. Com o parâmetro de suavização configurado para zero (liso = 0), a superfície resultante passa exatamente através dos pontos de dados.

5.6 Coleta de pontos de campo para validação dos modelos de elevação de terreno

Para a validação dos modelos digitais de terreno gerados pelos processos de filtragem, foi realizada uma coleta de dados em campo, com o auxílio de dois receptores GNSS *ProMark 220* (www.spectraprecision.com/eng/promark-220.html) em modo diferencial (DGPs), sendo um utilizado como base fixa, e outro utilizado como unidade móvel para coleta dos dados. O conceito de posicionamento DGPS (*Differential Global Positioning System*) é baseado no uso de erros computados por uma base estática para correção dos dados dos receptores móveis que percorrem os vértices de interesse (INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA), 2013). As informações obtidas foram originadas através de transmissão de uma constelação de no mínimo 12 satélites, que obtém a altitude real e a ajustada segundo o uso dos dois sensores simultaneamente.



Figura 14. Fotografia da coleta dos dados em campo em um alvo para processamento dos DGCPs

Como neste levantamento foi utilizado o método *stop and go* ou método de detecção semi-contínua, os arquivos precisam ser processados posteriormente em escritório. O tempo de ocupação em cada ponto foi de 5 minutos por ponto coletado durante todo o procedimento em campo. A precisão centimétrica é calculada nos pontos coletados através do software *Ashtech GNSS Solutions*, segundo as configurações definidas pelo utilizador com os dados brutos obtidos no terreno.

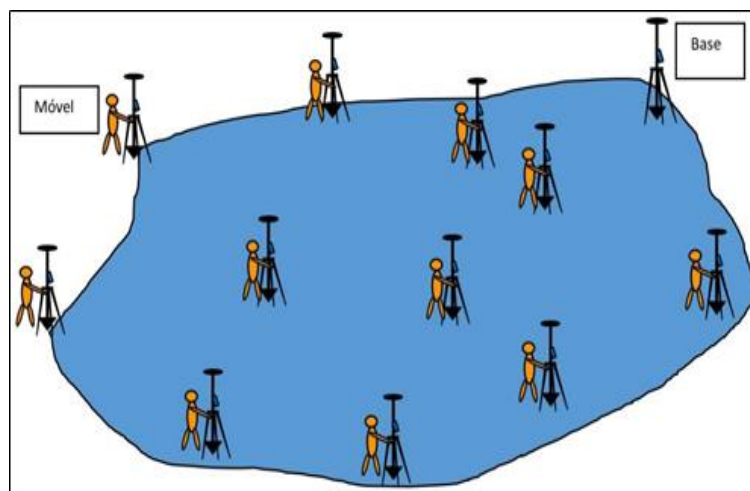


Figura 15. Esquema de coleta dos pontos em campo

A coleta de pontos por DGPS na Área 1 resultou em 81 pontos de posicionamento, com coordenadas X e Y e levantamento das altitudes Z. Na Área 2 foram coletados 85 pontos e na Área 3 foram coletados 100 pontos com o DGPS em campo. Os pontos coletados foram distribuídos aleatoriamente nas áreas de estudo, limitados pela acessibilidade do local. As configurações da base e do receptor móvel foram definidas igualmente. Inicialmente foi instalado um dos receptores operando como Base, para ajustes e correções das precisões relativas dos pontos coletados pelo receptor Móvel.

Essas configurações foram necessárias para a realização do pós-processamentos dos dados levantados em campo. Os pontos foram registrados utilizando coordenadas planas no sistema Universal Transverso de Mercator (UTM), utilizando o datum WGS 84. O GPS foi equipado com uma antena de altura de dois metros, e um tripé de auxílio para evitar inclinações na antena. Juntamente com a coleta de pontos cotados, foi medida a média da altura dos três indivíduos mais altos da vegetação no entorno de próxima ao cada ponto coletado. Essas medidas de altura de vegetação foram coletadas para identificação nas análises estatísticas das filtragens e variação de altura entre os modelos gerados neste trabalho.

5.7 Validação e análises estatísticas

Os dados gerados através dos diferentes algoritmos de filtragem foram comparados aos dados medidos com DGPS em campo através de regressão linear simples. A partir dos modelos ajustados, avaliamos a magnitude dos desvios entre as observações de solo e obtidas por imageamento através do coeficiente de determinação (R^2), e a presença de vieses de estimação através da análise dos coeficientes dos modelos.

Também foram calculados os erros (diferenças) entre os valores observados e estimados. Os modelos e erros foram calculados entre os dados observados em campo (DGPS) e os modelos de superfície e dois modelos de terreno gerados para cada uma das três áreas imageadas, ou seja, nove modelos. Também como forma de compreender e avaliar as diferenças entre as filtrações e interpolações utilizadas neste estudo, foram realizados cálculos de variáveis geomorfométricas, como a declividade das três áreas imageadas. O método de declividade utilizado foi o método de Horn, (1981) que consiste em calcular os valores de inclinação entre a superfície e um plano a 180°, método implementado no GRASS GIS 7.2 utilizando uma janela 3X3 para a realização do cálculo de declividade em percentagem.

Perfis longitudinais das três áreas foram gerados para comparação entre as diferenças de textura e filtragem dos métodos avaliados nesta dissertação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos métodos definidos na seção anterior, foram gerados os seguintes produtos como resultados: três nuvens de pontos densificadas, sendo uma para cada área imageada; ortomagem RGB referenciada automaticamente pelo software *PIX4Dmapper Pro*, de cada área imageada, com resolução espacial de 5 centímetros; modelos digitais de superfície para cada área com 5 centímetros de resolução espacial; modelos digitais de terreno, sendo dois modelos para cada área imageada, um deles gerado com o algoritmo *DTM-filter* e o outro com o algoritmo *Mcc-lidar*.

6.1 Gerações das nuvens de pontos através do algoritmo *Structure-From-Motion*

As nuvens de pontos densificadas geradas contiveram mais de 1 bilhão de pontos para cada área imageadas (Figura 15), com uma demanda de processamento de aproximadamente 48 horas (64 GB de memória RAM, processador Intel® Core™ I7-5820K CPU 3,30GHZ, placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 970 de 4 GB, e sistema de armazenamento de dados composto por duas unidades SSD operando em paralelo).

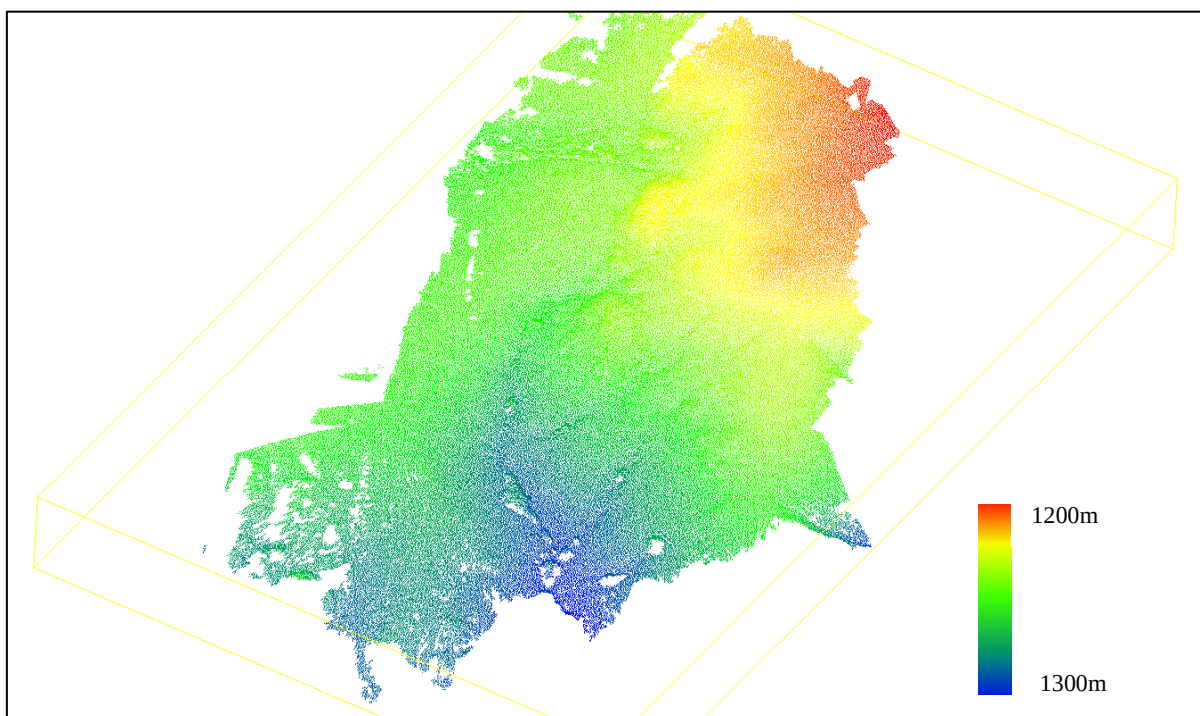


Figura 16. Exemplo de nuvens de pontos em formato *.las* da Área 1 (*Vellozia*)

Na Área 1, 433 das 489 imagens adquiridas (98%) atingiram o critério mínimo de recobrimento e, portanto, foram utilizadas para a geração dos produtos obtidos neste estudo. Na Área 2 foram utilizadas 97% das fotografias aéreas obtidas, e na Área 3, 96%. O algoritmo gera em média 1 milhão de pontos-chave na nuvem esparsa e ~ 110 milhões de pontos para cada área de cobertura (nuvem densa). A densidade média final de pontos na nuvem gerada foi de 73 pontos por metro cúbico. Esses dados podem ser identificados com os demais gerados que se encontram no ANEXO 1(dados gerados no próprio PIX4D) e Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Avaliação dos resultados da geração de nuvens de pontos a partir das imagens aéreas coletadas utilizando VANT.

	Área 1 (Vellozia)	Área 2 (Cedro)	Área 3 (Q 16)
Média da distância de amostragem (<i>ground sampling distance</i> , GSD)	5,24 cm	4,82 cm	6,68 cm
Área de cobertura do imageamento	0,85 km ²	1,23 km ²	1,61 km ²
Média de pontos gerados por fotografia obtida no levantamento	52.464	57.853	42.306
Quantidade de fotografias aéreas utilizadas para geração das nuvens de pontos	433 de 439	490 de 498	563 de 574
Pontos GCPs (<i>Ground Control Point</i>) utilizados para o Georreferenciamento	3 GCPs	4 GCPs	3 GCPs
Média dos erros residuais (RMS error)	0,169 m	0,092m	0,145 m
Números de pontos em 3D gerados em cada 2 imagens	1.527.347	2.415.009	1.477.824

A otimização da câmera teve uma diferença relativa de 3,3% entre os parâmetros iniciais e após a otimização de seus ajustes. Foi feita uma média de 31.446 combinações por imagem calibrada e o erro quadrático médio (RMS) do georreferenciamento foi de 0,169 m, erro classificado como classe A dentro do Padrão de exatidão Cartográfica (PEC).

6.2 Filtragens com o método *DTMfilter*

O primeiro método de filtragem foi realizado utilizando o Modelo Digital de Superfície gerado diretamente pelo software *PIX4Dmapper Pro* (Figura 17). A filtragem e interpolação pelo método *raster* para a Área 1 (Vellozia) gerou um MDT com 295.409.654 células, e altitude média de elevação no terreno de 1253,6 metros, variando entre 1201,8 e 1319,1 metros em toda a sua extensão.

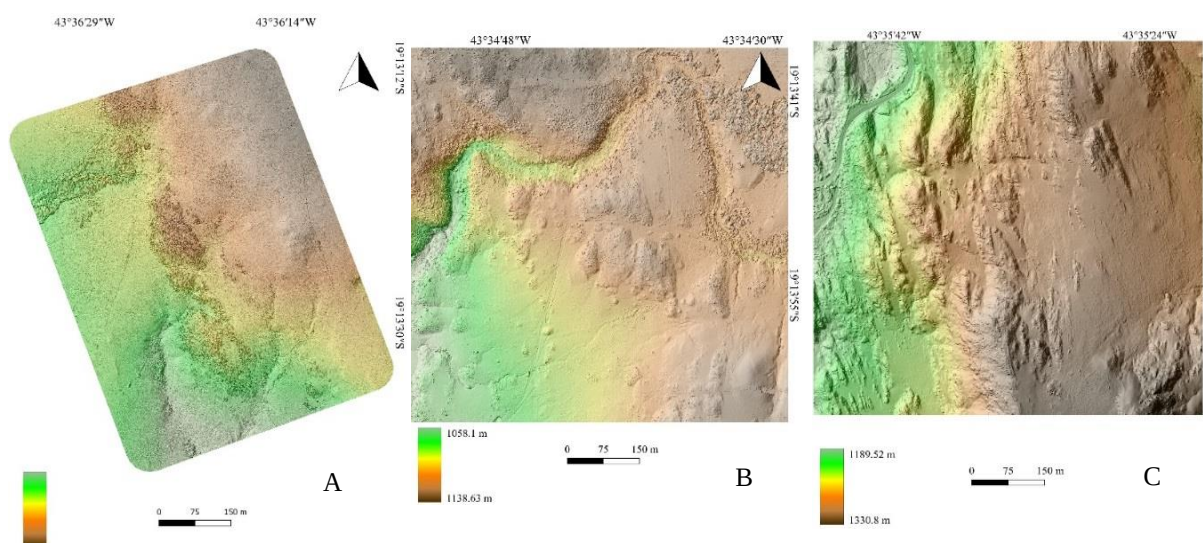


Figura 17. Modelo digital de superfície das três áreas processadas, com sobreposição de sombreamento de terreno com *raster* de relevo sombreado com ângulo de elevação a 40° e azimute a 300°. Em A, temos a área 1, em B a área 2 e em C a área 3.

A validação do MDT gerado com os dados obtidos em campo por DGPS resultou em coeficiente de determinação $R^2 = 0,978$ ($p < 0,05$) para a área 1, indicando pouca divergência entre as distribuições dos dados observados e os dados estimados após o processamento da área. Apesar desta baixa divergência, a análise dos erros indicou a presença de um viés, com um valor de intercepto de 96,04 e um coeficiente angular de 0,92; o modelo estimado está abaixo da linha de referencia 1:1 (Figura 21), ou seja, os valores estão sendo subestimados em relação aos dados observados. O valor médio do erro encontrado nesta área foi de -0,68m, também demonstrando que o modelo final apresentou subestimação da elevação em relação aos valores reais de altitude local. Os erros tiveram valores mínimos de -4,15m e máximo de 14,83m. Os pontos amostrados que obtiveram os maiores erros de amostragens foram: ponto 35 com erro de superestimação de 14,83m, e o ponto 47 com subestimação de -4,15m (figura 20).

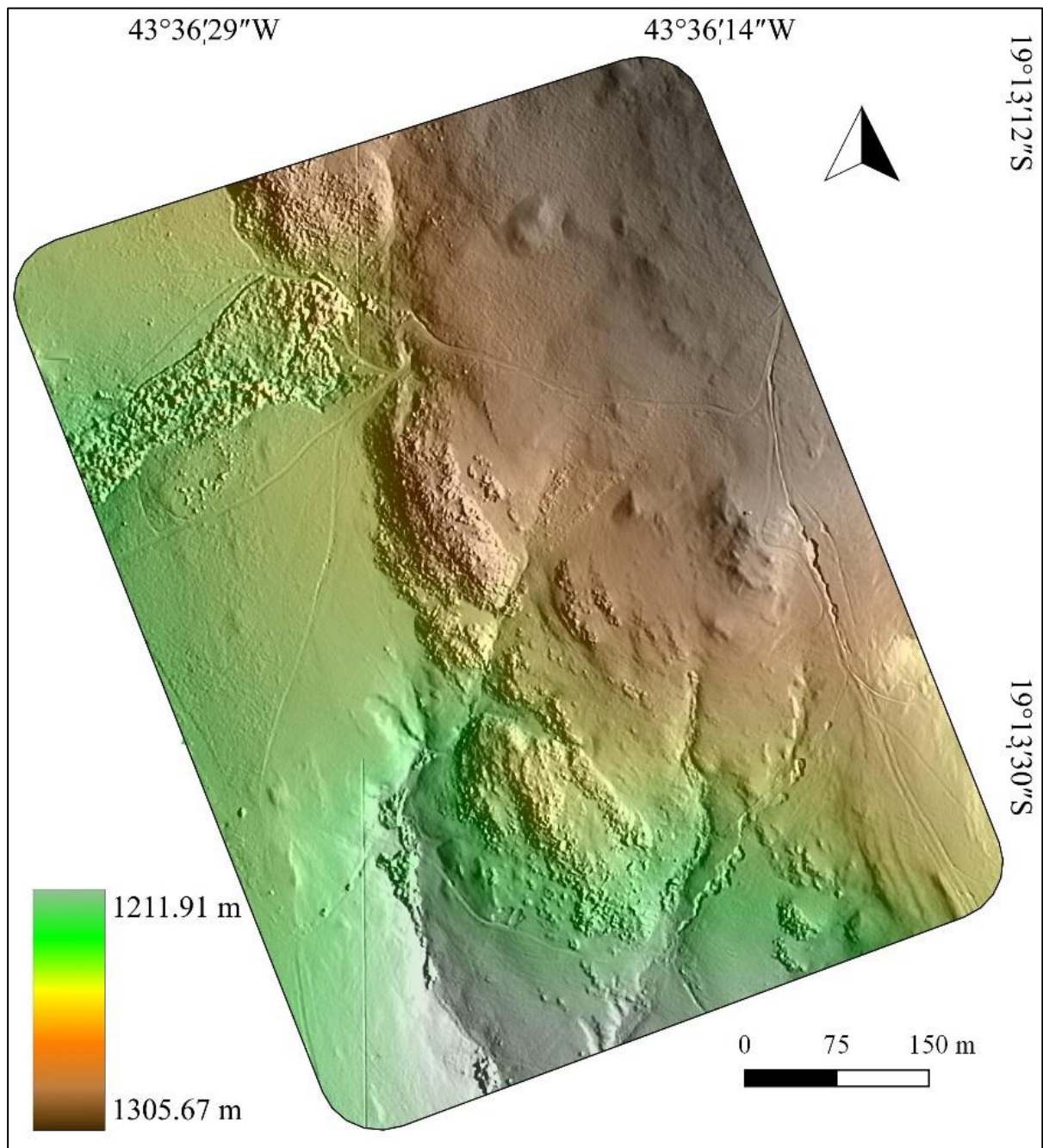


Figura 18. Modelo digital de terreno da área 1, filtrado com o algoritmo *DTM-filter*, mostrado com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimute a 80°.

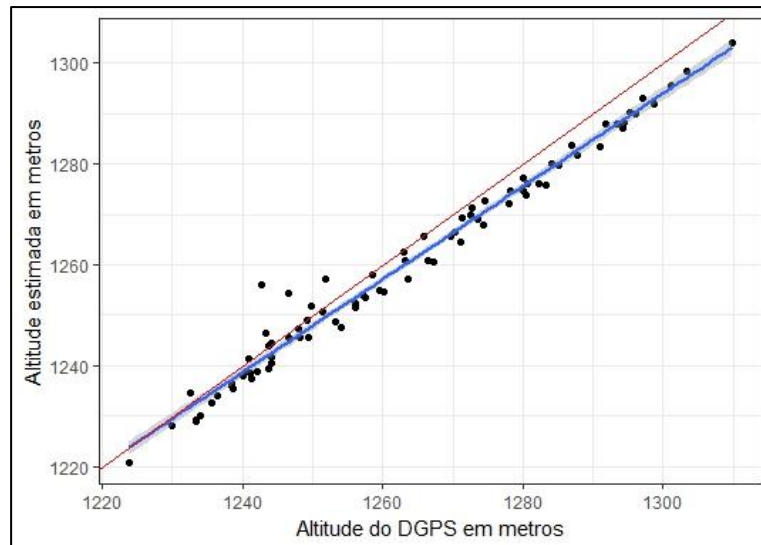


Figura 19. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por *raster* da área 1. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1. A área sombreada ao longo da linha azul representa o intervalo de confiança de 95% em relação ao modelo de regressão estimado.

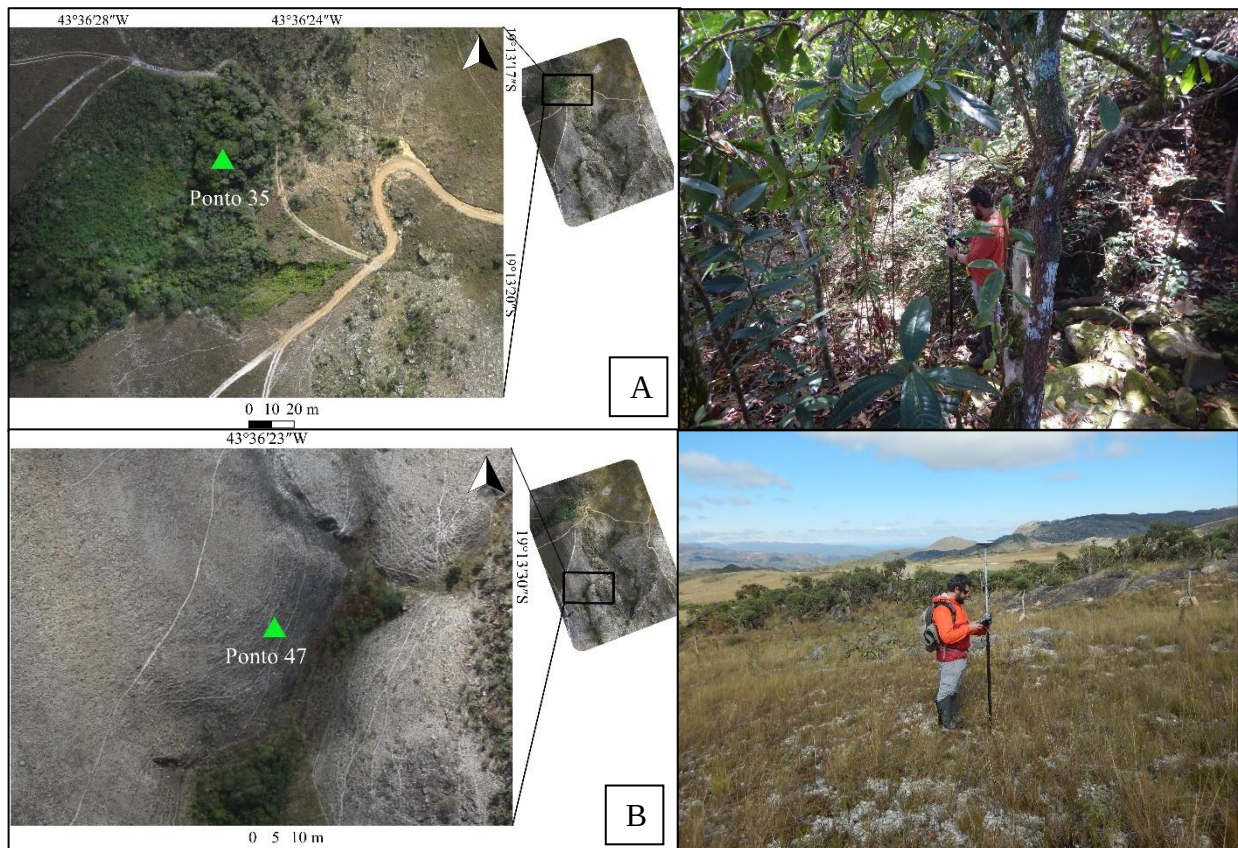


Figura 20. Pontos da área 1 onde ocorreram os maiores erros de filtragem dos modelos. Em “A” o ponto 35, dentro de uma área de mata ciliar; em “B” o ponto 47, área com campo pedregoso, com declividade um pouco acentuada e também próximo a uma área de mata ciliar.

Para a Área 2 (Cedro), obtivemos um *raster* com 704.778.000 células, e altitude média de elevação de 1103,7 metros, variando entre 1040,4 e 1149,9 metros de altitude em toda a sua extensão (Figura 20). A validação do MDT com os dados observados em campo por DGPS resultou em um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,98$ ($p < 0,05$), também demonstrando alta correlação entre os dados observados e os dados estimados.

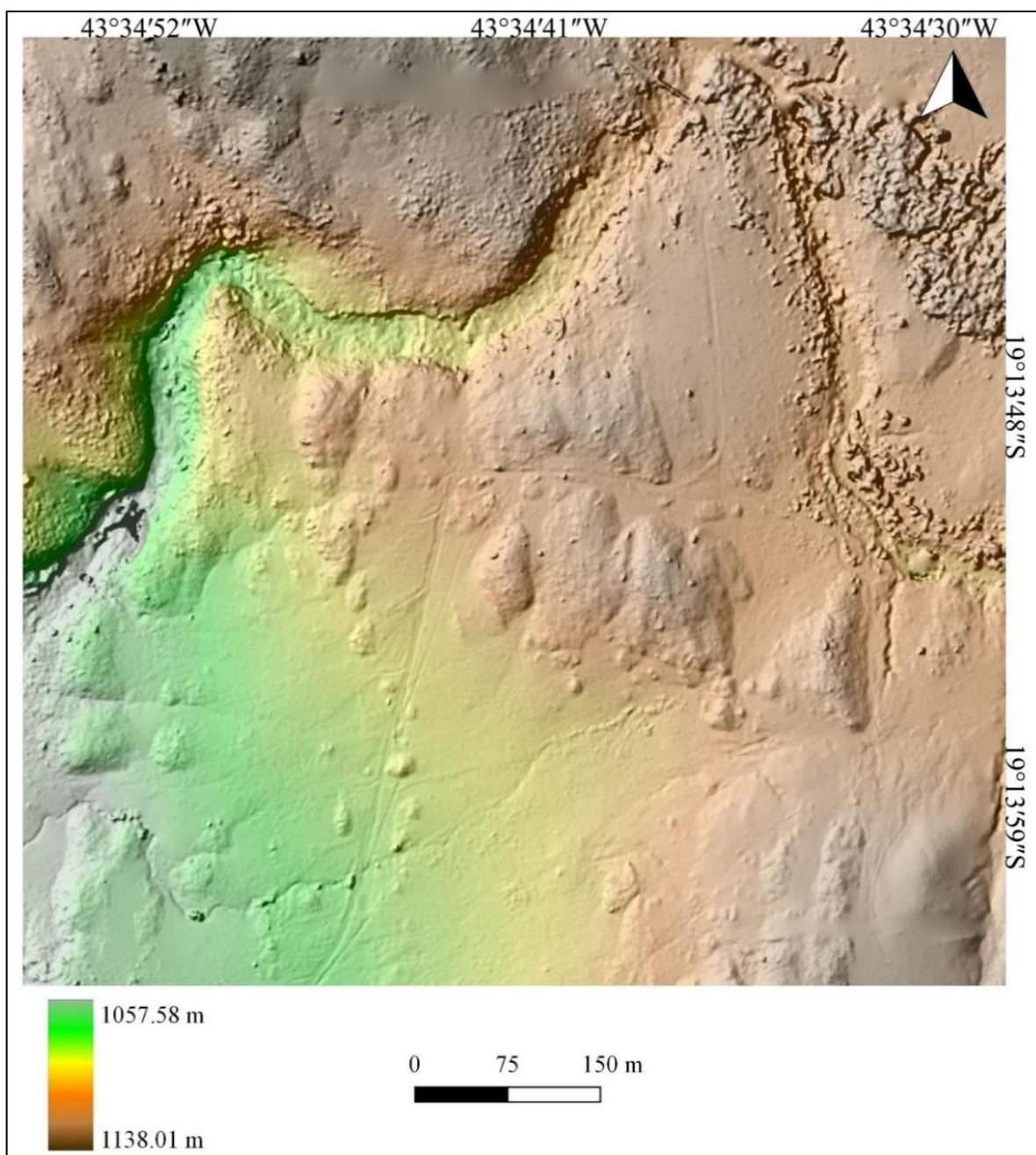


Figura 21. Modelo digital de terreno da área 2, com sombreamento de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 40° e azimute a 300°.

Novamente, apesar da alta correlação entre dados, os valores estão todos abaixo da linha de referência 1:1, ou seja, subestimados segundo a linha de referência. Os coeficientes de determinação tiveram seu intercepto com valor de -81,58 e o coeficiente angular de valor 1,06. O valor médio do erro foi de -0,26 m, indicando a subestimação dos valores reais de altitude local. Os resíduos encontrados tiveram valores mínimos de -8,89 e máximo de 5,07 metros (figura 21). Os pontos amostrados que obtiveram maiores erros em suas amostragens foram: ponto 59 (erro de -8,89m) e ponto 44 (erro de 5,07m).

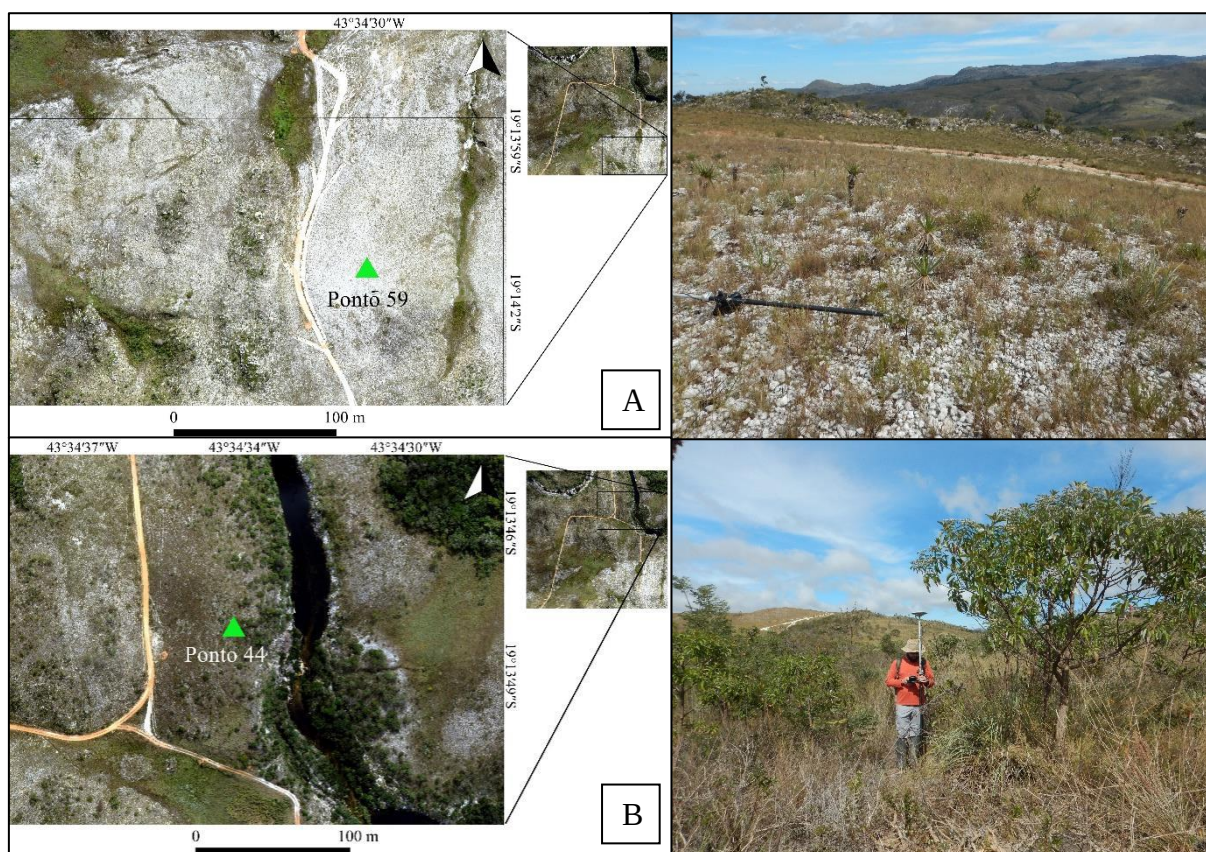


Figura 22. Fotografias da área 2, com os pontos onde ocorreram as maiores diferenças de filtragem dos modelos. Em “A” o ponto 59, fica em área aberta de campo pedregoso com vegetação de gramíneas esparsas e baixas (média de altura da vegetação de 0,37 centímetros), e em “B” o ponto 44, que fica próximo ao Rio Cipó e de sua mata ciliar, com arvoretas e herbáceas com uma média de vegetação de 2,95 metros.

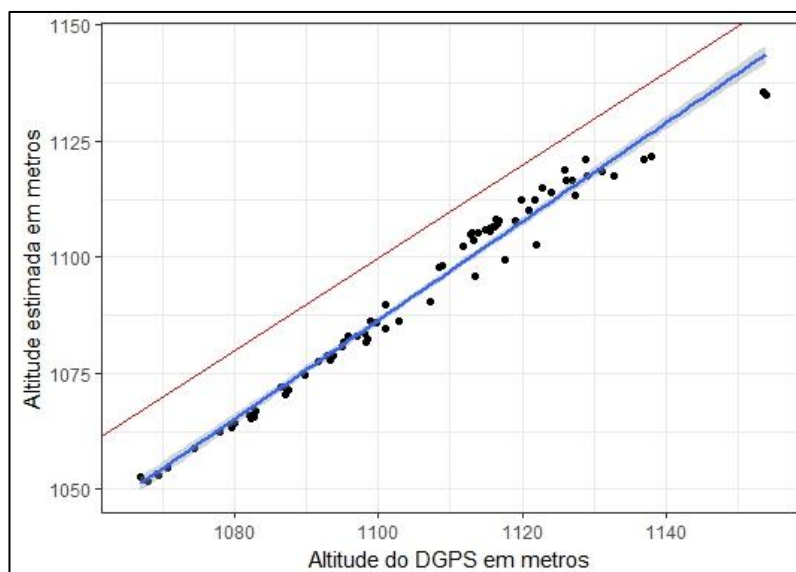


Figura 23. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por *raster* da área 2. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1. A área sombreada ao longo da linha azul representa o intervalo de confiança de 95% em relação ao modelo de regressão estimado.

Para a Área 3 (Quadrante 16), obtivemos um *raster* de dimensões de 256.032.001 células, com altitude média de elevação de 1267,97 metros, variando entre 1170,26 e 1351,84 metros de altitude. A validação do MDT com os dados observados em campo com o DGPS resultou em um coeficiente de determinação com $R^2 = 0,999$ ($p < 0,05$), a mais alta correlação entre os dados observados e os dados estimados dentre todas as áreas. Apesar da alta correlação dos dados, os valores também ficaram todos abaixo da linha de referencia 1:1, ou seja, subestimados. Os coeficientes da regressão tiveram seu intercepto com valor de 55,05 e coeficiente angular de valor 0,96. O valor médio do erro foi de 0,01m, o melhor valor encontrado comparando as três áreas processadas, mas também com subestimação da elevação em relação aos valores reais de altitude local. Os resíduos encontrados tiveram valores mínimos de -1,31 e máximo de 1,12 metros.

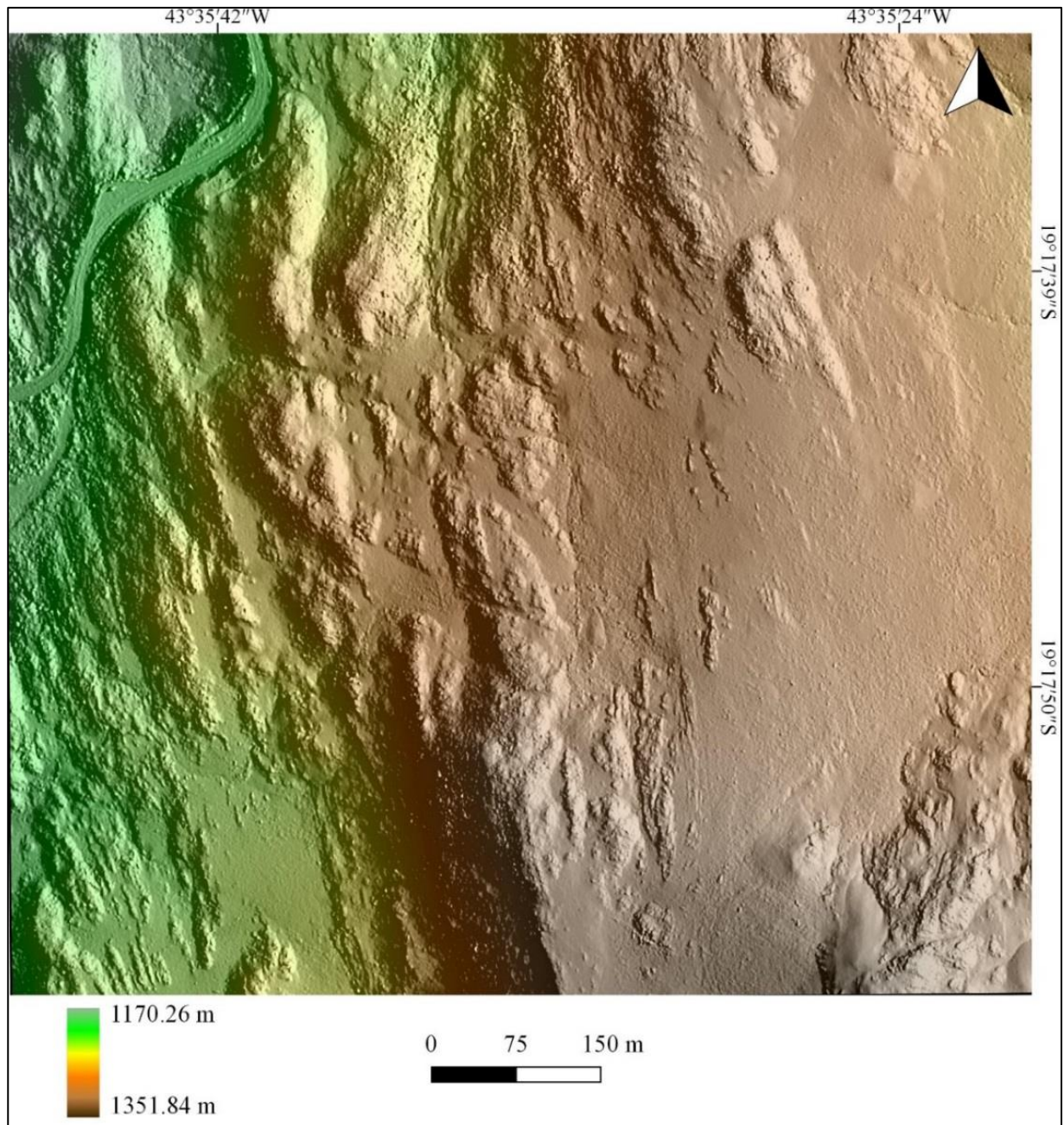


Figura 24. Modelo digital de terreno da área 3, com sombreamento de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimuth a 80°.

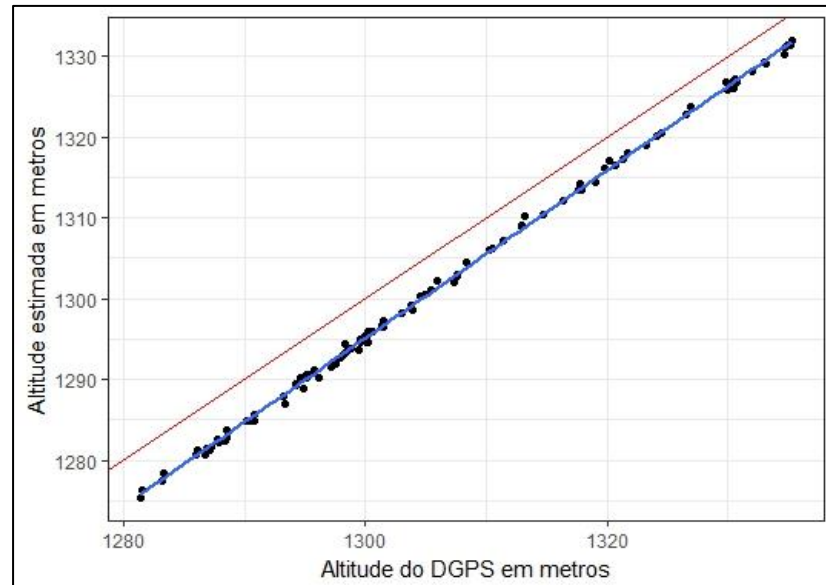


Figura 26. Comparação entre valores observados versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por *raster* da área 3. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1

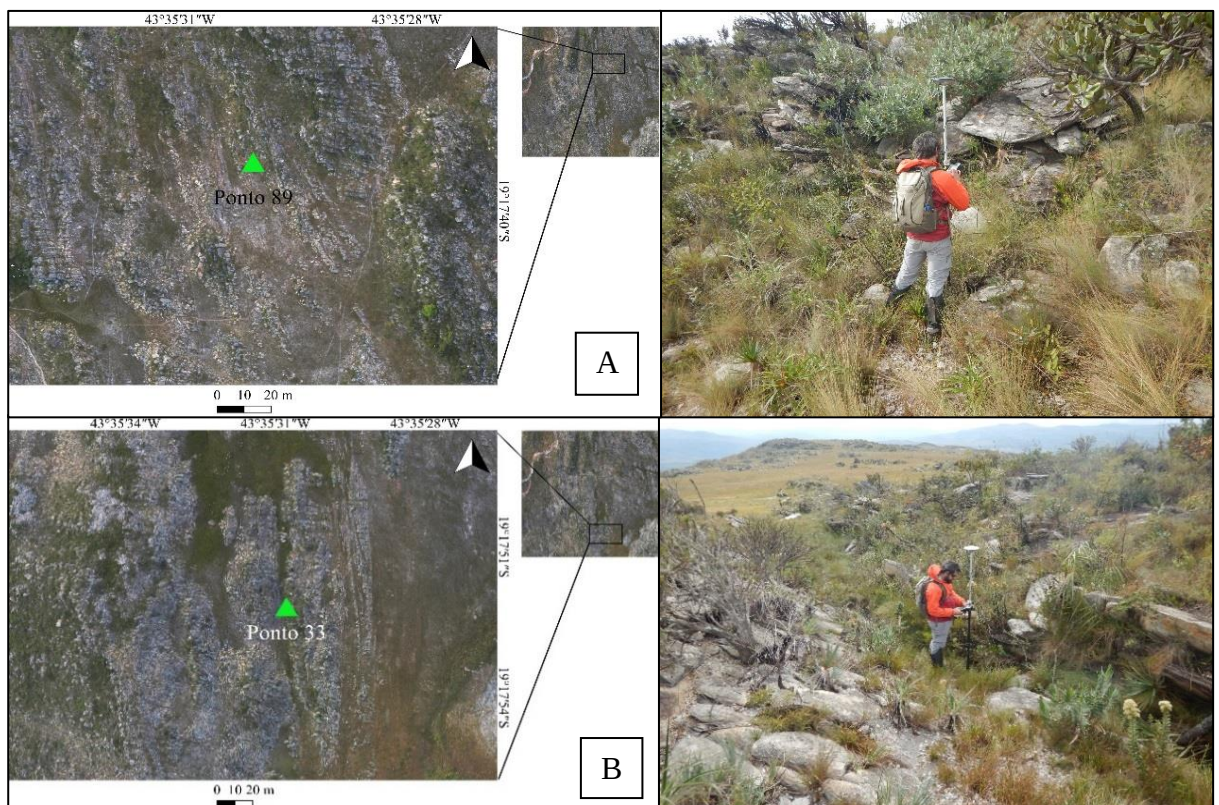


Figura 25. Fotografias da área 3 (Quadrante 16) com os pontos onde ocorreram as maiores diferenças de filtragem dos modelos. Em “A” o ponto 89, fica em área de desnível de afloramento rochoso, com presença de arvoretas e herbáceas em seus entremeios (média de altura da vegetação de 1,18 metros e diferença de filtragem de 1,13 metros), e em “B” o ponto 33, que também fica próximo a afloramento rochoso e arvoretas, com uma média de vegetação de 0,76 centímetros e diferença de estimacão de -1,31 metros.

Ao observarmos as fotografias tiradas no local dos pontos coletados com o DGPS e as diferenças das estimações observadas com as vegetações, podemos notar que houveram boas estimativas entre as alturas das vegetações observadas e as diferenças das filtrações, com erro médio aproximado da filtração na área 1 foi de -0,676 centímetros, na área 2 foi de -0,263 centímetros, na área 3 foi de 0,025 centímetros. Ou seja, entre os três modelos gerados, a área 3 foi a área em que a filtração obteve as melhores estimativas de filtração do modelo gerado pelo algoritmo *DTM-Filter*, devido aspectos visuais encontrados nos modelos gerados.

6.3 Filtrações das nuvens de pontos

A filtração direta das nuvens de pontos utilizando o algoritmo *Mcc-LiDAR* gerou resultados com percentuais semelhantes para as três áreas processadas, com aproximadamente 95% dos pontos das nuvens de pontos originais classificados como pontos de chão (*ground*) e aproximadamente 5% classificados como pontos de não-chão (*non-ground*) (tabela 2).

Tabela 2 - Números de nuvem de pontos gerados após as filtrações com o algoritmo *Mcc-LiDAR*

	Área 1 (Vellozia)	Área 2 (Cedro)	Área 3 (Quadrante 16)
Total de pontos da nuvem de pontos densificadas	116.173.181	140.011.349	145.804.324
Total de pontos da nuvem de pontos classificadas como <i>ground</i>	109.323.059	133.215.560	141.479.853
Total de pontos da nuvem de pontos classificadas como <i>non-ground</i>	6.850.122	6.550.369	3.884.878
Porcentagem de pontos classificados como <i>ground</i>	94%	95,1%	97,3%
Porcentagem de pontos classificados como <i>non-ground</i>	6%	4,9%	2,7%

O método de filtragem realizado sobre as nuvens de pontos na Área 1 resultou em um modelo digital de terreno contendo uma alta correlação com os dados coletados para validação, com um R^2 de 0,98 e p-valor $<0,05$. Essa alta correlação aconteceu não somente na área 1, mas também para todas as três áreas processadas. Contudo, observou-se uma tendência do modelo em subestimar os valores de altitude do terreno em relação a reta 1:1. Outros objetos que resultaram em erros de estimativa foram estradas de terra e pequenas construções de edificações e casas dentro da área.

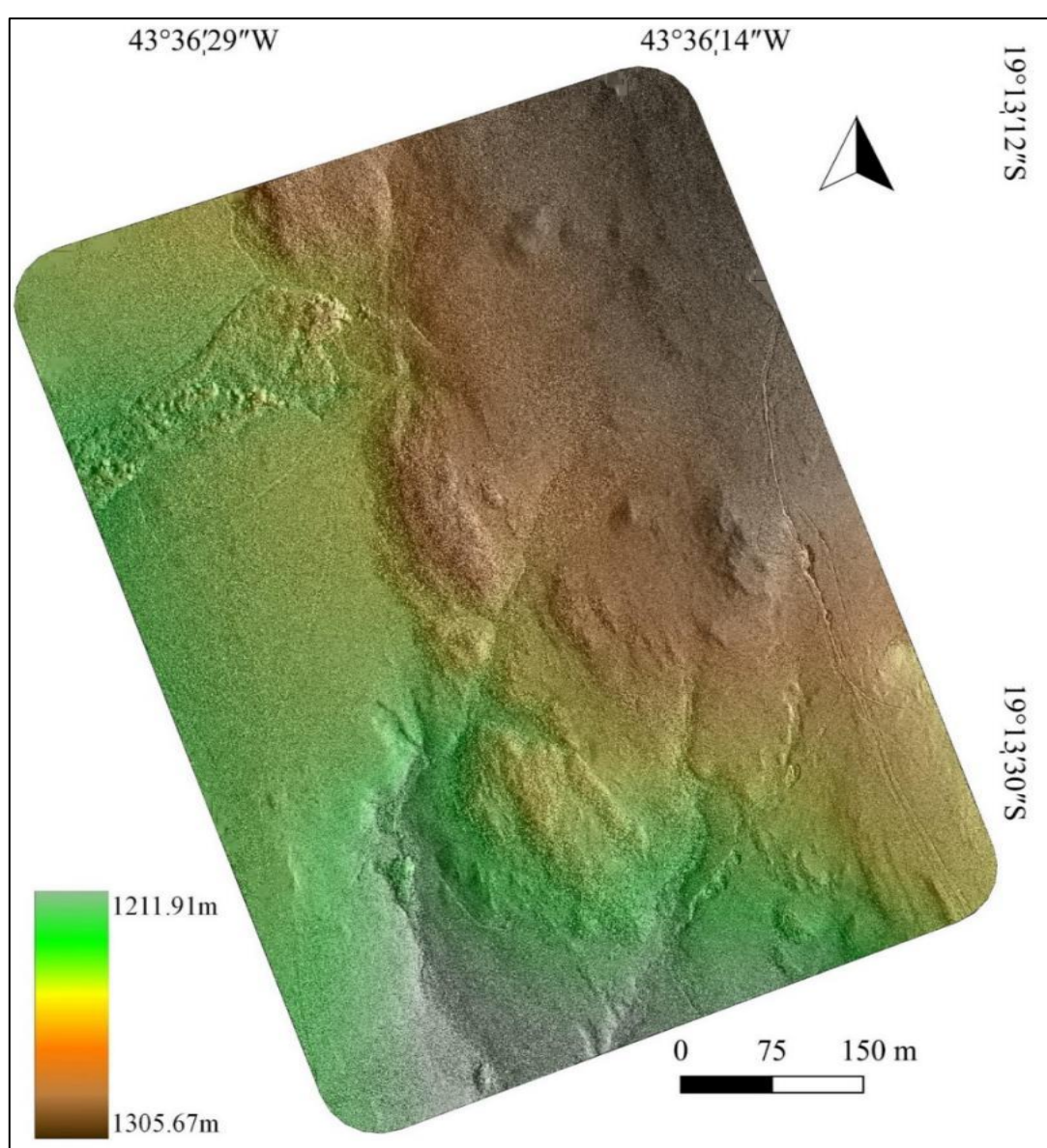


Figura 27. Modelo digital de terreno gerado por filtragem da nuvem de pontos para a Área 1 com sombreamento de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimute a 80°.

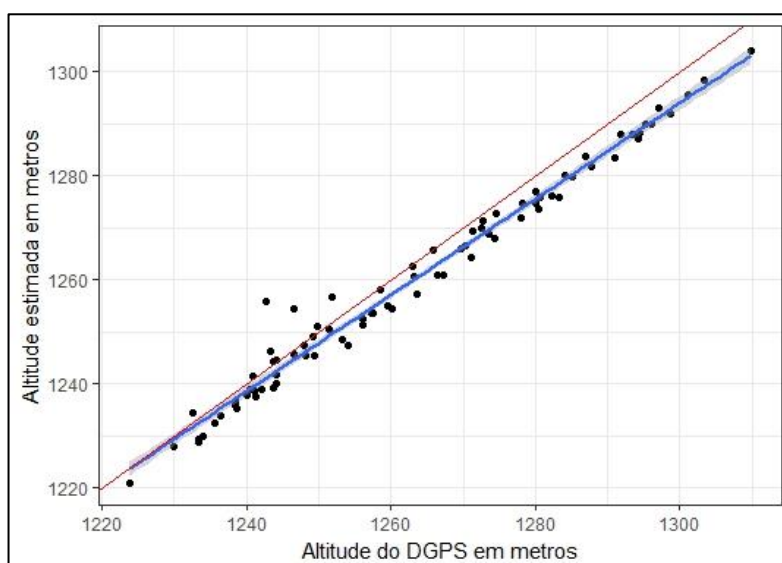


Figura 28. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por nuvem de pontos na Área 1. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados extraídos do MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1.

Na área 2 (Cedro) o método de filtragem usando as nuvens de pontos gerou um *raster* de altitude média de elevação de 1103,9 metros, variando entre 1057,6 a 1138,5 metros de altitude em toda a sua área de extensão. A validação do MDT com os dados observados em campo com o DGPS resultou em um coeficiente de determinação $R^2 = 0,979$ e p-valor menor que 0,05. Assim como o modelo digital de terreno filtrado pelo algoritmo *DTMFilter*, o modelo digital de terreno filtrado pela nuvem de pontos também teve altitudes subestimadas levando em consideração a linha de referencia 1:1. O modelo de regressão teve intercepto com valor de 82,14 e o coeficiente angular de valor de 1,06, valores semelhantes aos apresentados na

filtragem anterior (intercepto com valor de 81,58 e coeficiente angular de valor 1,06). O valor médio do erro foi de 0,24 m, com erros mínimos de - 8,93 e máximo de 5,64 metros.

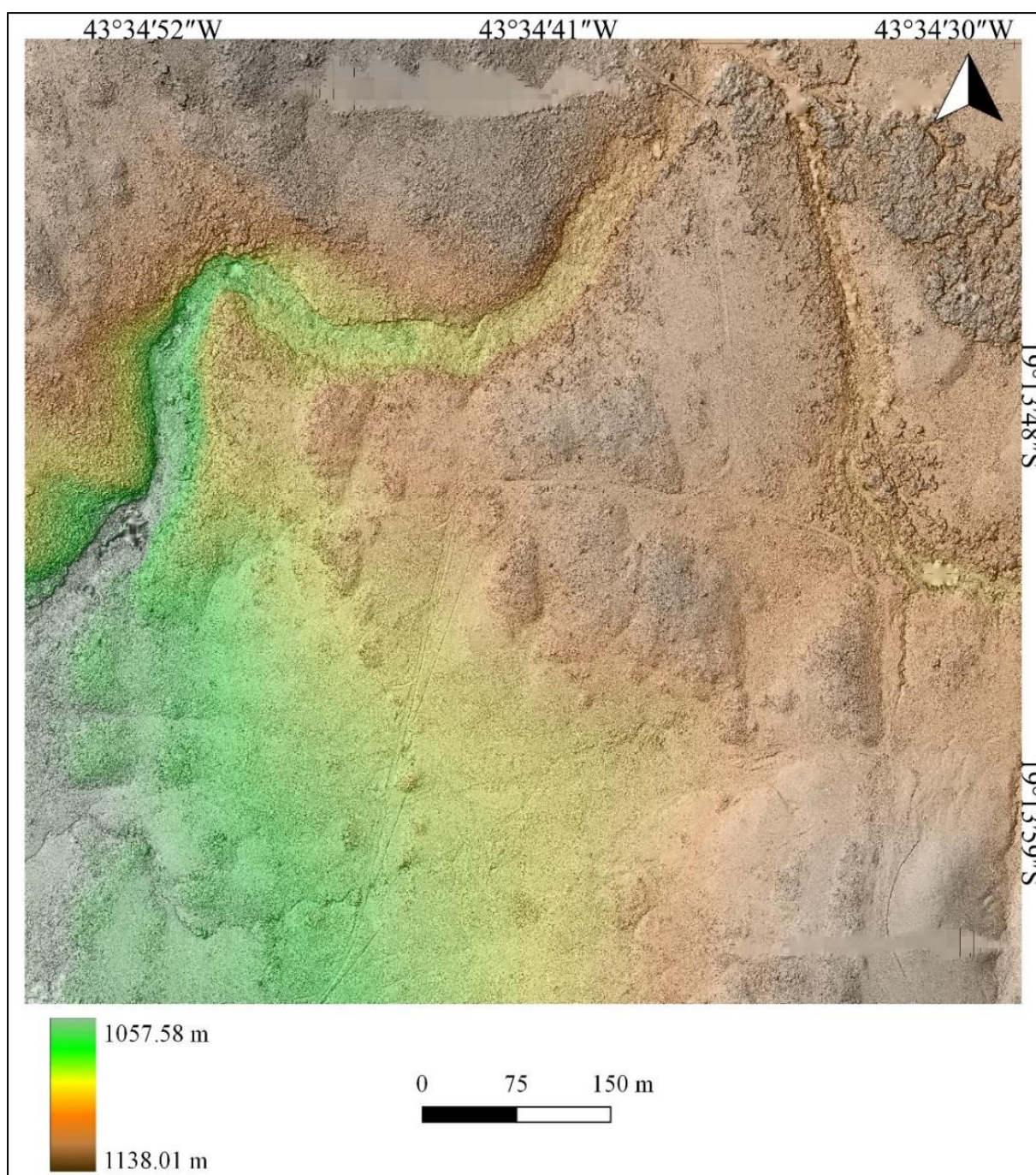


Figura 29. Modelo digital de terreno filtrado pelo algoritmo *Mcc-lidar* da área 2, com sombreamento de terreno com ângulo de elevação a 65° e azimuth a 80°, com exagero vertical de 1.5.

Para a Área 3, o método de filtragem da nuvem de pontos obteve um coeficiente de determinação com $R^2 = 0,99$ $p < 0,05$, similar ao observado para o método *raster*, e com valores subestimados e abaixo da linha de referencia 1:1. O modelo de regressão teve intercepto com valor de 55,38 e coeficiente angular de valor de 0,96. O valor médio do erro foi de 0,02 m, 1 centímetro maior que o MDT gerado a partir da filtragem *raster*. O erro médio encontrado foi de 0,48, com valores mínimos de -1,27 e máximo de 1,17 metros.

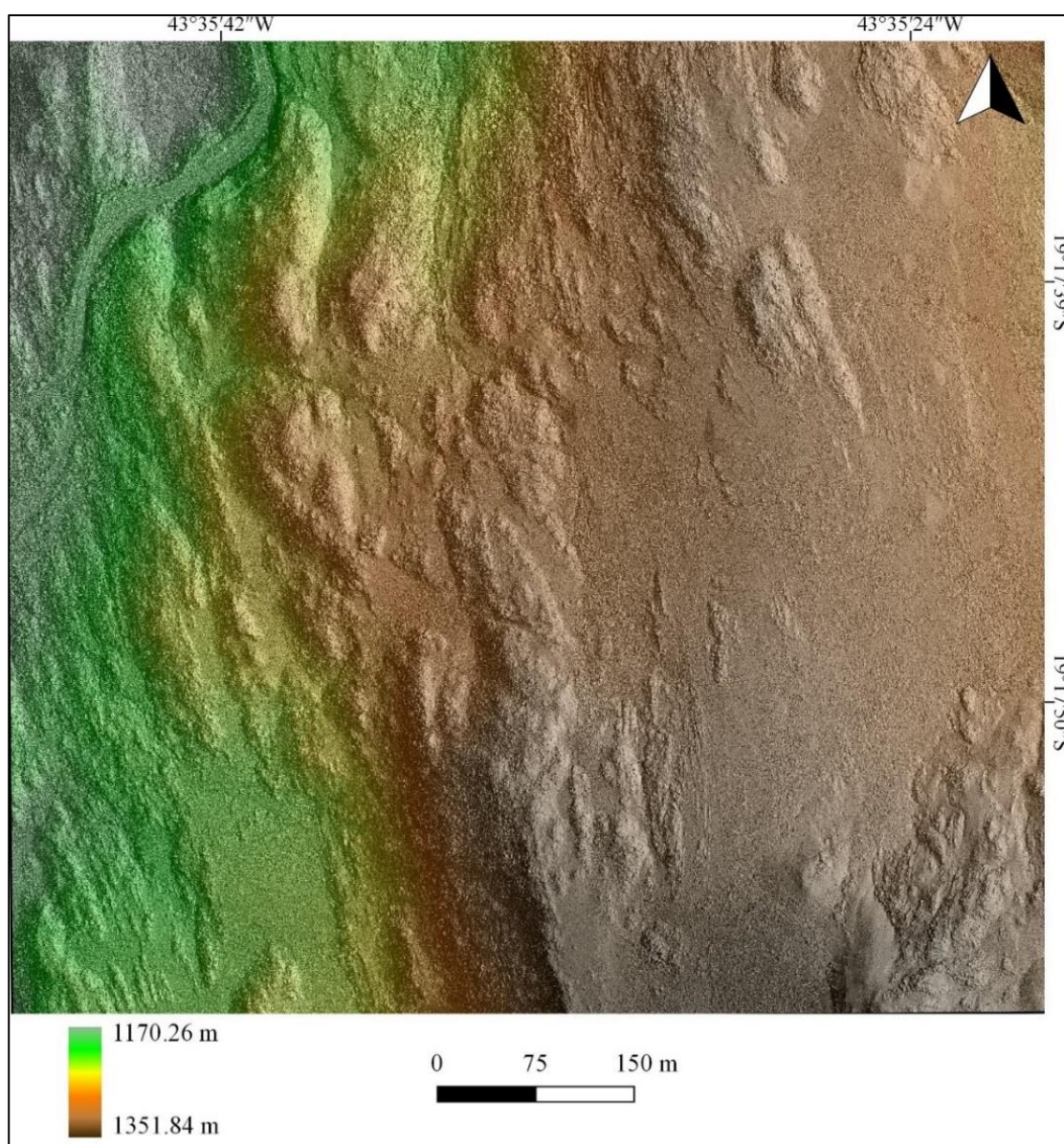


Figura 30. Modelo digital de terreno da área 3, com sombreado de terreno com relevo sombreado com ângulo de elevação a 65° e azimuth a 80°.

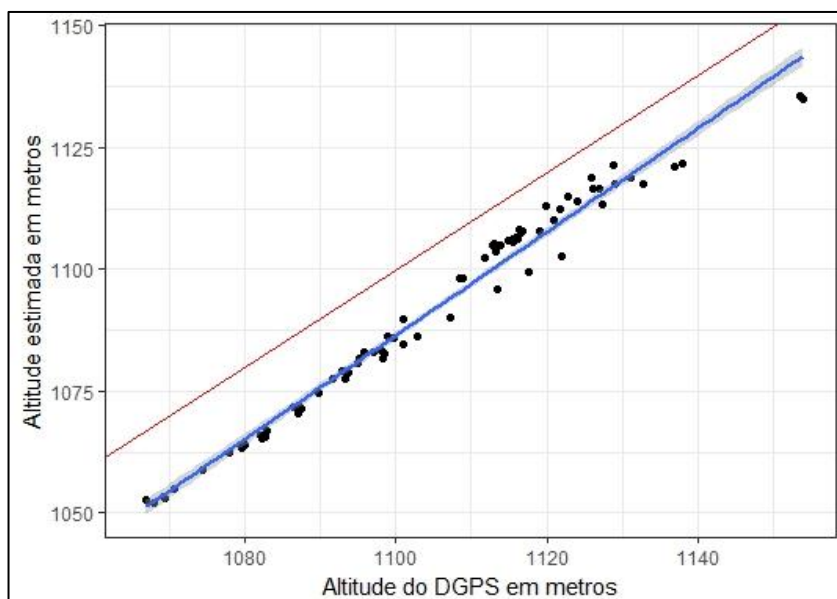


Figura 31. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por nuvem de pontos na área 2. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em formato MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1.

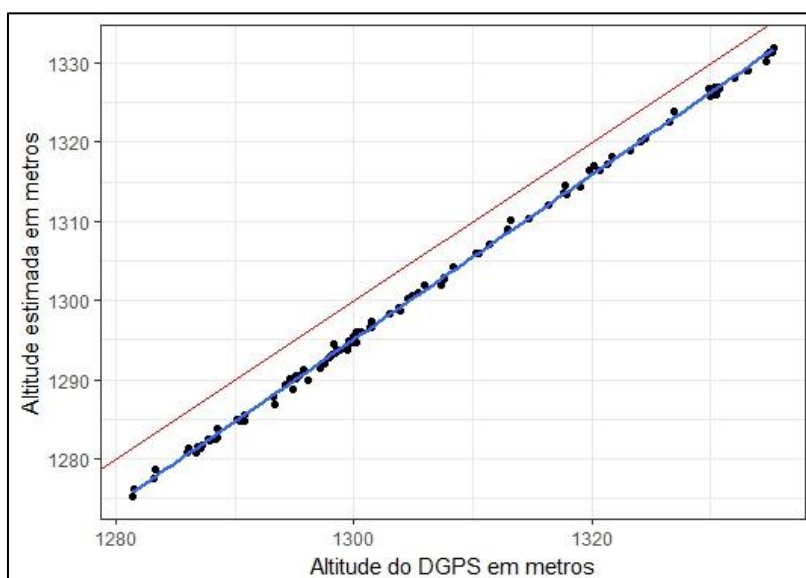


Figura 32. Comparação entre valores de altitudes observadas versus estimadas segundo o método de filtragem de dados por nuvem de pontos na Área 3. No eixo X, temos os dados obtidos através do uso em campo de um receptor DGPS e no eixo Y os dados gerados em formato MDT. A linha azul do gráfico corresponde à regressão linear entre as duas fontes de dados e a linha vermelha corresponde à linha de referência da relação 1:1.

6.4 Avaliação dos erros e comparação entre os resultados

Ao avaliarmos os dois métodos de filtragem e as diferenças entre os erros reportadas para cada modelo digital de terreno gerado neste estudo, faz-se necessário observar além das estatísticas e seus coeficientes obtidos através das análises, identificar também que nas diferentes áreas temos variações altitudinais ou de elevação de cada terreno, assim como as variações na realização das missões de cada imageamento para diferentes áreas e as variações dos tipos vegetacionais presentes em cada área imageada. Mesmo estando dentro de uma mesma fitofisionomia de Campo Rupestre, as variações entre cada área devem ser levadas em consideração segundo para avaliar as representações obtidas nestes levantamentos.

Outro fator relevante para entendimento das diferenças são os resultados obtidos nas análises estatísticas, onde podemos comparar as diferenças entre os métodos, observamos que as diferenças entre as observações e cálculos dos dados entre as áreas são muito sutis e pouco perceptíveis, como visto na tabela 3.

Tabela 3 - Valores obtidos nas análises estatísticas entre os dois métodos de filtragem e interpolação de dados

		Área 1		Área 2		Área 3	
		Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
Coeficientes	R ²	0.98	0.98	0.98	0.98	1.00	0.96
	Intercepto	96.04	94.99	-81.58	-82.14	55.05	55.38
	angular	0.92	0.92	1.06	1.06	0.96	0.96
	Mínimo	-4.15	-4.10	-8.90	-8.93	-1.31	-1.27
Resíduos	Média	-0.68	-0.68	-0.26	-0.24	0.01	0.03
	Máximo	14.83	14.93	5.07	5.64	1.12	1.18
Pontos com maiores erros		31,33, 34, 35,47	33, 34, 35	59,60,71	59,60,71	33,100,94	33,100,94

Em áreas com cobertura vegetal predominantemente herbácea e presença de indivíduos arbustivos e arbóreos esparsos, os filtros adotados se mostraram eficientes, tanto para a filtragem efetuada com o *DTM-filter* sobre o modelo digital de superfície como para a filtragem

direta dos dados da nuvem de pontos pelo algoritmo *Mcc-LiDAR*. Em sua maioria, as diferenças são mostradas de forma sutil, com a remoção de valores de elevação espúrios pontuais.

Em áreas onde a vegetação encontrada é mais baixa e esparsa (figura 33), ao realizarmos um perfil desta área, podemos verificar que a filtragem juntamente com a interpolação do método DTM-filter suaviza as feições do terreno, mas ao contrário do outro método (*Mcc-Lidar*) ele não aumenta informações ou ruídos desnecessários ao modelo gerado.

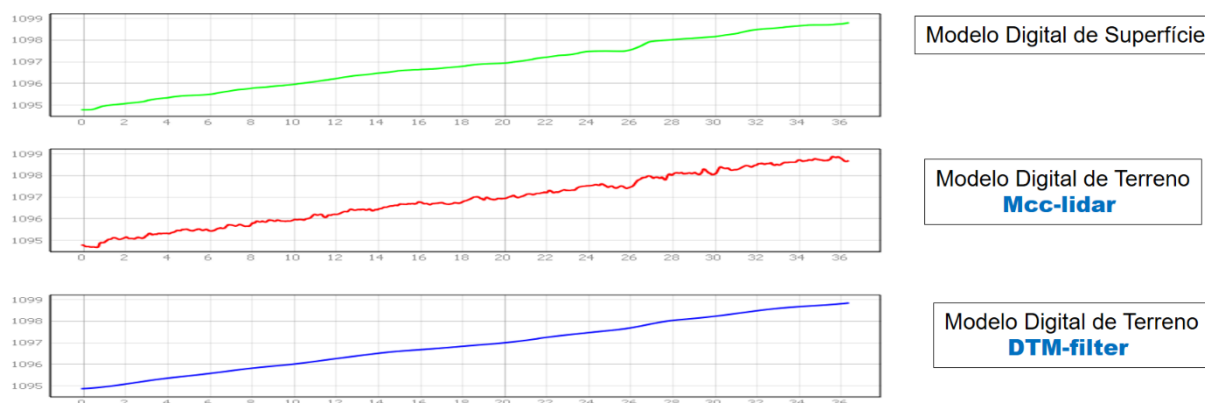


Figura 33 – Perfis Longitudinais de área com vegetação baixa e esparsa

Nas áreas com vegetações florestais, que se encontram dentro das áreas de mananciais (área de nascentes de rios, por exemplo) ambos os métodos tiveram uma confusão em relação a filtragem destas vegetações mais altas (figura 34).

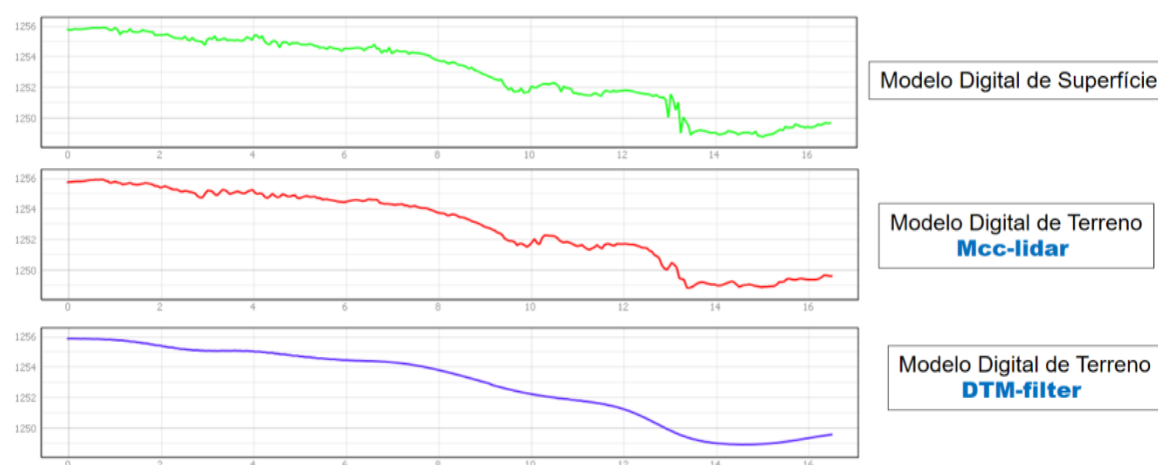


Figura 34 - Perfis Longitudinais de área com vegetação alta e densa

Isso ocorre principalmente pelo fato de que o filtro entende que a área por não ter correspondências de altitude de sua superfície ou o fundo destes mananciais, e este extrato arbóreo então é compreendido pelo filtro e pelo interpolador como uma feição da superfície, como mostrado na figura abaixo:

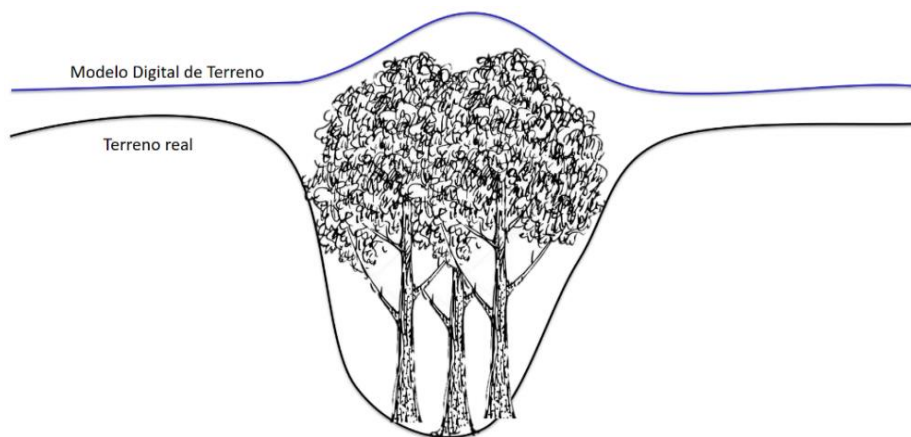


Figura 35 – Ilustração do terreno real com seu extrato arbóreo de densidade alta e cobertura vegetal próxima a superfície da borda das áreas de mananciais e como o modelo digital de terreno realiza esta feição, identificando a vegetação como uma nova forma no terreno.

Quando observamos cada área de estudo separadamente, podemos notar características únicas para cada variável ambiental discutida neste trabalho. Isso pode ser observado principalmente na Área 3 (Quadrante 16) onde os dados filtrados se correlacionam especialmente melhor com as altitudes medidas em campo. Para áreas de vegetação arbórea densa, como para a mata ciliar da Área 1, encontramos os pontos com os maiores erros. Nesta região, ocorre uma maior diferença na inclinação do terreno (a área se mostra com um maior declive em relação a sua região ao entorno), mas os objetos que recobrem o solo são mais altos que os demais. Quando observamos os valores destes erros, observamos um erro de estimação de 11 metros, da mesma ordem da altura média da vegetação no local (13 metros). Assim, a densidade do dossel da vegetação arbórea interfere diretamente na associação entre os valores estimados e os valores observados em campo. Estes altos valores de erro na Área 1 estão associados à vegetação encontrada na área de afluentes de manancial do Rio Cipó.

Na Área 2, quando observamos o ortomosaico e as fotografias tomadas durante o trabalho de campo, podemos observar que o primeiro ponto que obteve a maior diferença ocorreu em uma área aberta, porém próximo a área com arbustos e arvoretas mais altas que a vegetação ao seu redor, induzindo a um erro maior da filtragem na região. Outros erros

ocorreram por um problema de recobrimento do imageamento inicial das fotografias aéreas, como no segundo ponto apresentado na Área 2. Neste ponto, observamos a ocorrência do erro associado a falta de recobrimento aparente do voo do VANT, resultando em problemas de interpolação.

Quando observamos a relação entre os valores de altura da vegetação em relação aos erros de estimação entre os pontos de campo e a elevação estimada pelos modelos digitais de elevação, podemos notar que há uma baixa correlação desses erros com a altura da vegetação, para dosséis de baixo porte (Figura 33). A exceção é observada para a Área 1, que mostra um aumento do erro de estimação para locais com dosséis altos.

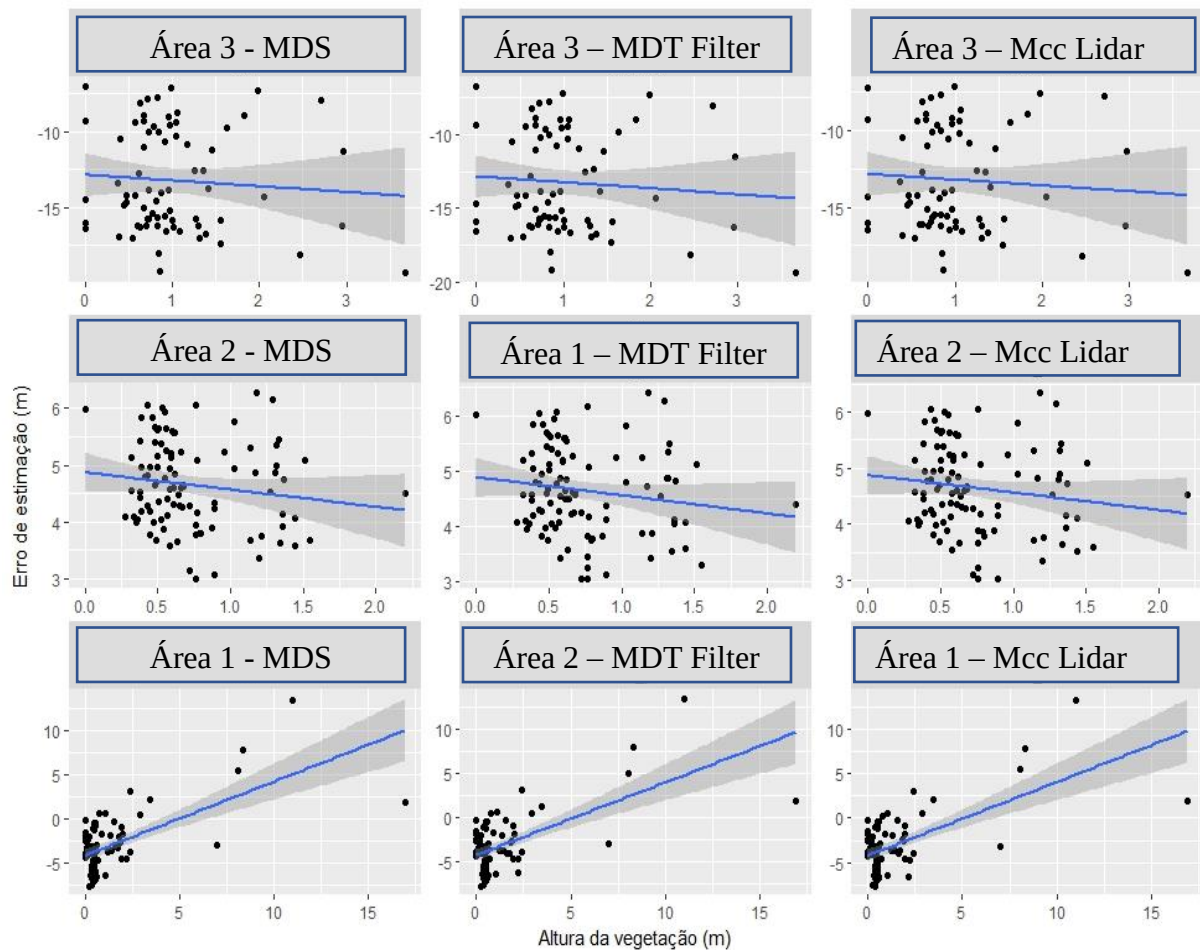


Figura 36. Distribuição das alturas da vegetação e dos erros estimados encontrados em cada modelo digital de elevação gerado dentro deste trabalho.

A efetividade da filtragem pode ser melhor visualizada através do cômputo e visualização das diferenças entre o modelo digital de superfície original e o modelo digital de terreno filtrado. Quando observamos estas diferenças para as três áreas, notamos que a remoção da vegetação se mostrou eficiente para ambas as áreas. Observando a ortoimagem de cada área em comparação à diferença entre os modelos, percebemos a predominância de diferenças de valores de altitude nas áreas de maior densidade vegetal, enquanto que em áreas pouco vegetadas, como no caso das estradas de terra, o processo de filtragem não causou nenhuma alteração (Figura 34).

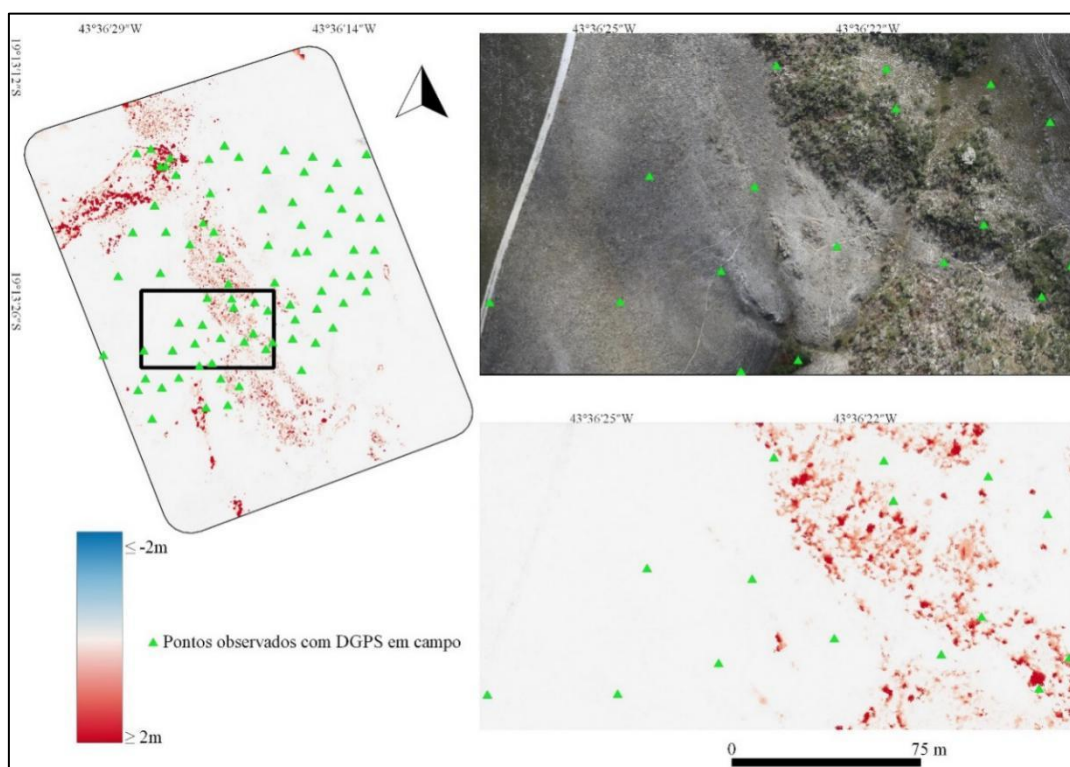


Figura 37. Mapa das diferenças entre o modelo digital de superfície da área 1 e o modelo digital de terreno filtrado com o algoritmo *Mcc-lidar*. O zoom das áreas nos mostra as diferenças de cobertura vegetal na área e os objetos filtrados na cor vermelha na figura.

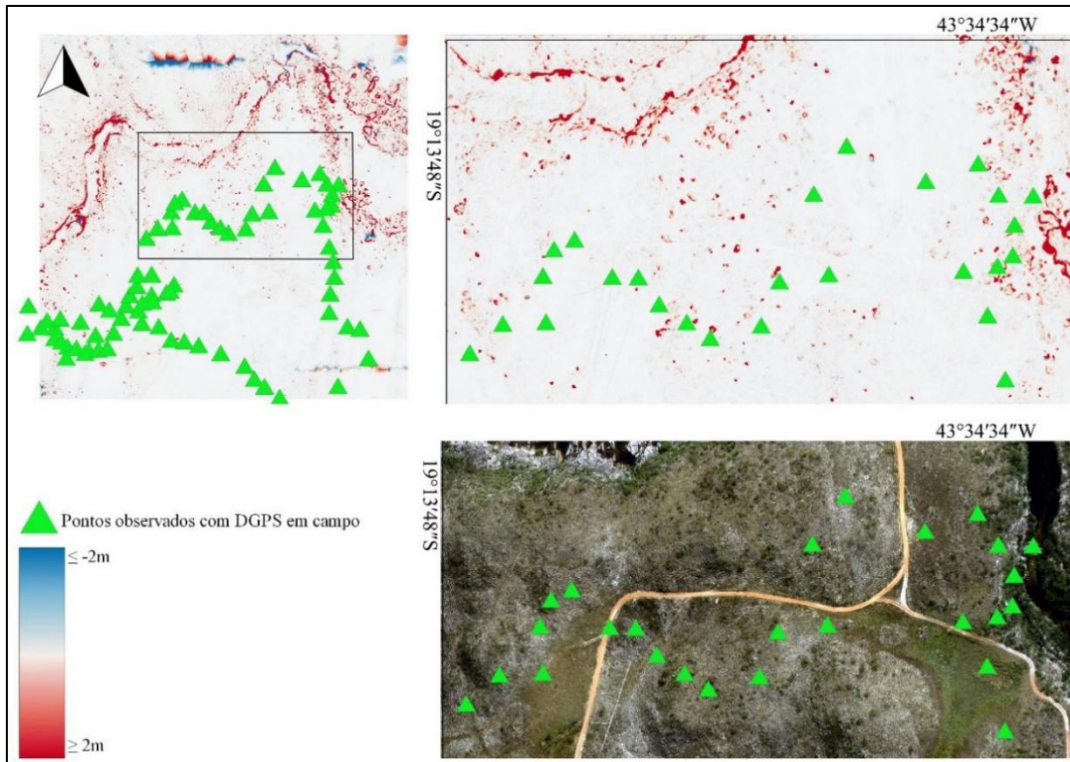


Figura 38. Mapa das diferenças entre o modelo digital de superfície da área 3 e o modelo digital de terreno filtrado com o algoritmo *Mcc-lidar*. O zoom das áreas nos mostra as diferenças de cobertura vegetal na área e os objetos filtrados na cor vermelha na figura.

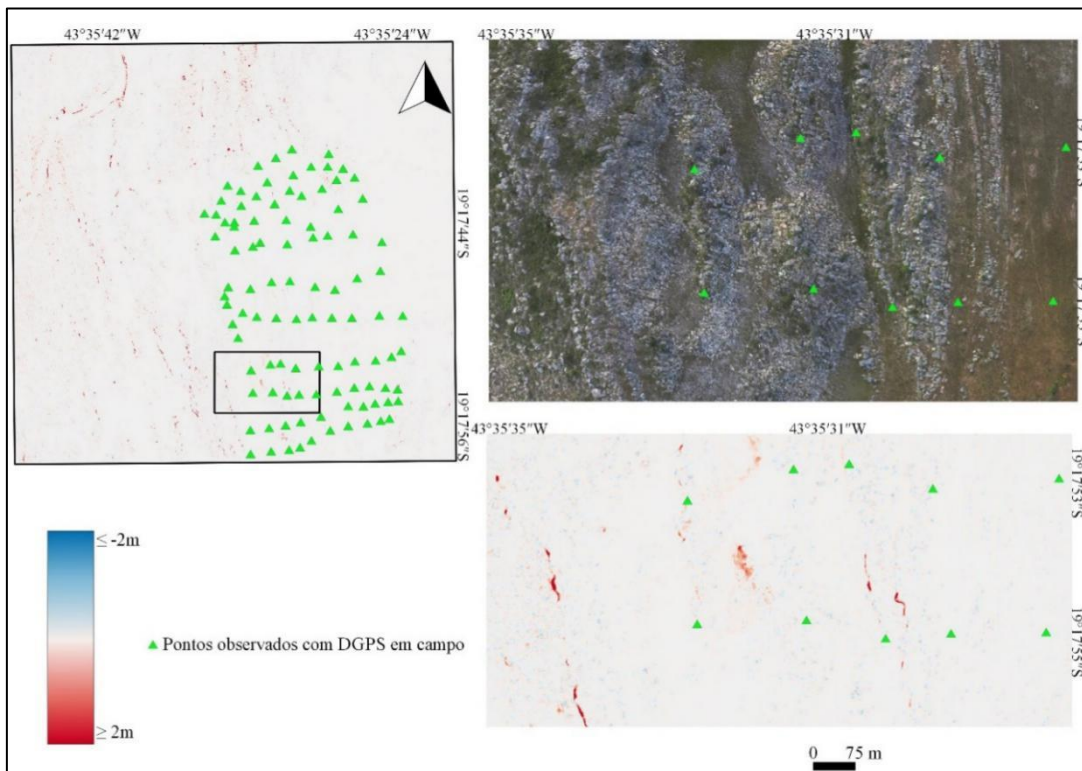


Figura 39. Mapa das diferenças entre o modelo digital de superfície da área 2 e o modelo digital de terreno filtrado com o algoritmo *Mcc-lidar*. O zoom das áreas nos mostra as diferenças de cobertura vegetal na área e os objetos filtrados na cor vermelha na figura.

A subestimação generalizada dos valores de altitude estimados para os Modelos Digitais de Terreno, em relação aos pontos de campo, é provavelmente advinda de uma baixa qualidade do georreferenciamento realizado durante o processamento inicial pelo software Pix4D, o qual foi baseado em um número reduzido de pontos de controle em solo. Ainda assim, os altos coeficientes de determinação observados indicam que a representação relativa da forma do terreno pode ser utilizada com confiança. Modelos gerados dados com um ajuste fino de georreferenciamento (MICELI et al., 2011; SANTISE et al., 2014) poderão conduzir a uma melhor acurácia e precisão de ajuste vertical dos modelos digitais de elevação através do uso de um número maior de coletas de pontos GCPs para melhorar a precisão vertical (REMONDINO et al., 2014a).

Os pontos de controle são fundamentais na correção geométrica (REMONDINO et al., 2014b) sendo levadas em consideração as análises de produtos cartográficos com base no Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC) que inclui cálculos de erros médios quadráticos e a sua tolerância vertical, estipulados segundo o Decreto 89.817 de 20 de julho de 1984 (MICELI et al., 2011). Outra informação importante é introduzir na aquisição dos imageamentos o Controle Estatístico de Processos (CEP), que com técnicas estatísticas monitoram os processos de ajustes geométricos, melhorando os resultados dos processamentos (ZHANG; MONTGOMERY, 1994).

A variação da inclinação das retas ajustadas através dos modelos de regressão indica variação do erro de estimação em função da altitude, e pode estar associada com a variação da distância entre a aeronave e solo ao longo do imageamento. Nos gráficos dos modelos de regressão, podemos observar que em imageamentos onde o VANT é lançado das áreas mais baixas do terreno, a reta tende a ter seu intercepto negativo, enquanto que quando o voo é lançado de uma região com maior elevação, ele tende a ter um intercepto da reta com valor positivo. Quando observamos a área 1, onde o voo sai da área mais alta em relação a todas as altitudes do terreno a ser imageada, o intercepto do gráfico de correlação foi positivo e teve uma tendência a ter maior correlação da reta com os valores nas altitudes mais baixas e ficando mais distante da linha 1:1 conforme aumentava a altitude dos imageamentos.

Na área 2 percebemos exatamente o oposto. A decolagem foi realizada da área de menor elevação dentro da região a ser imageada, e quando observamos o gráfico de correlação é visível

a subestimação dos valores e uma tendência das altitudes menores dentro da área imageada de estarem mais distantes da reta 1:1 e das altitudes maiores estarem mais próximas da reta. Quando observamos a decolagem da Área 3, juntamente com os dados filtrados tanto para o método em *raster* como para o método em nuvem de pontos, podemos observar que a decolagem foi realizada em uma área de elevação média, tendo o intercepto negativo, mas mostrando menores diferenças entre os erros nas áreas com maiores e menores altitudes.

O sistema de piloto automático do VANT utilizado não possui informação sobre a variação de altitude do terreno, e os voos são planejados para serem realizados sempre em uma mesma altura acima da altitude do ponto de decolagem (Figura 35). Ao se realizar imageamento em áreas acidentadas, recomendamos assim priorizar o lançamento da aeronave a partir de locais com altitudes médias em relação à variação de elevação da região, para uma melhor geração de modelos digitais de elevação assim como dos diferentes produtos realizados nos imageamentos com VANTs.

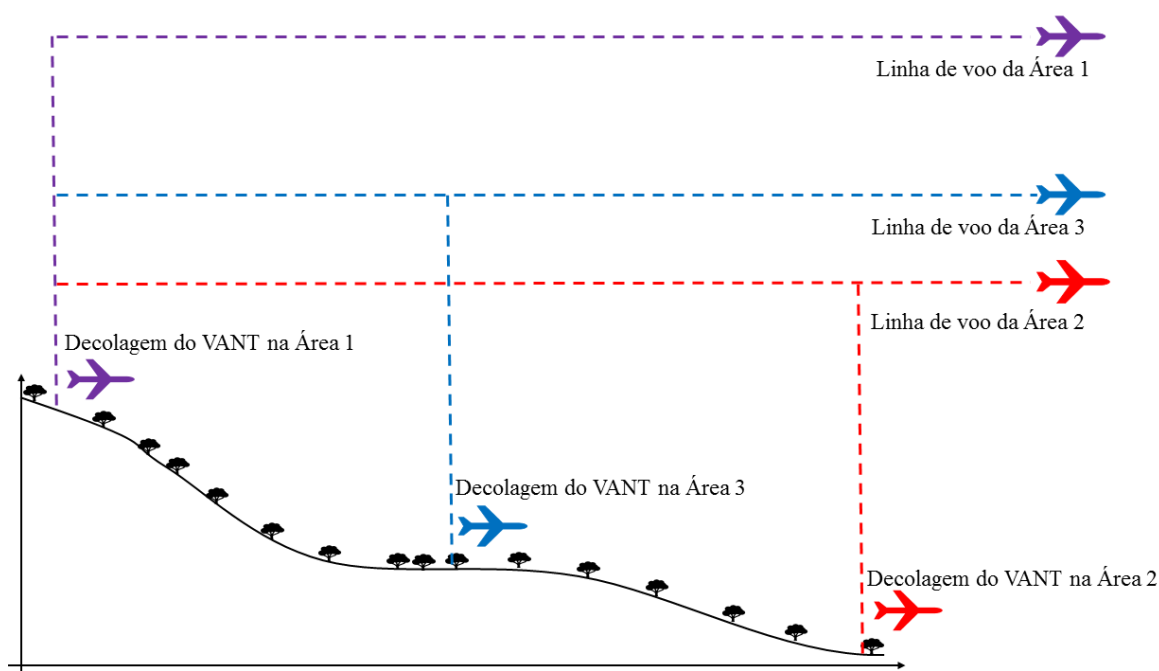


Figura 40. Variações da distância entre o sensor e a superfície devido à diferenças na altitude de decolagem e variação topográfica nas linhas de voo para as três áreas imageadas.

A distorção projetiva é um fator que também pode levar as distorções maiores quanto aos levantamentos fotogramétricos, na geração dos modelos digitais de elevação. Sua tolerância

angular padrão é de 3 graus, porém devido o VANT voarem com constantes rajadas de vento, inferindo em extrapolações off-nadir importantes em seus imageamentos (MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, 2001). Importante ressaltar que essas alterações podem ser modificadas com modificações dos parâmetros de entrada, quando observados grandes distorções no imageamento.

Apesar dos efeitos da filtragem serem sutis, a realização ou não da filtragem pode ter efeitos significativos sobre a derivação de variáveis geomorfométricas. Com o cálculo de declividade nas três áreas distintas (figura 39), podemos visualizar as diferenças de texturas resultantes dos diferentes interpoladores deste estudo. Quando observamos os modelos digitais de superfície, identificamos a presença de uma textura que consegue representar as feições do relevo local, porém afetada pelos objetos que ainda não foram removidos pelos processos de filtragem. Ao compararmos este resultado com os modelos digitais de terreno realizados pelos métodos de nuvem de pontos (algoritmo Mcc-LiDAR), onde foi utilizado o interpolador *Spline* por tensão (RST), verificamos que devido à alta resolução espacial (5 centímetros) e um grande adensamento das nuvens de pontos que agregam um grande número de informações sobre o terreno, o interpolador resultou em alguns artefatos e ruídos mais visíveis do que antes do processo de filtragem. Quando a pesquisa científica focar em processos de micro feições, este seria um bom método de interpolação por ser mais realístico com menores diferenças de padrão nas áreas do modelo. Quando observado as declividades geradas por esse interpolador, podemos observar que para identificação de declividades o interpolador pode inferir algumas informações de declividades que não sejam interessantes para realização de compreensão da diferença de altitude como um todo.

Ao contrário deste método, ao observarmos as declividades geradas nos modelos digitais de terreno do método *DTM-filter* com uso de interpolador *Bicubico*, identificamos um maior alisamento das feições, ou seja, o interpolador suaviza mais a superfície deixando uma textura mais próxima a de uma membrana recobrindo o terreno, que diferente do método de interpolação RST, é mais indicado para compreensão da superfície como um todo, como por exemplo para a realização de modelos hidrológicos e entendimento dos cursos d'água e áreas de captação de água de uma bacia, identificação de padrões erosivos do solo, áreas agricultáveis, entre outros.

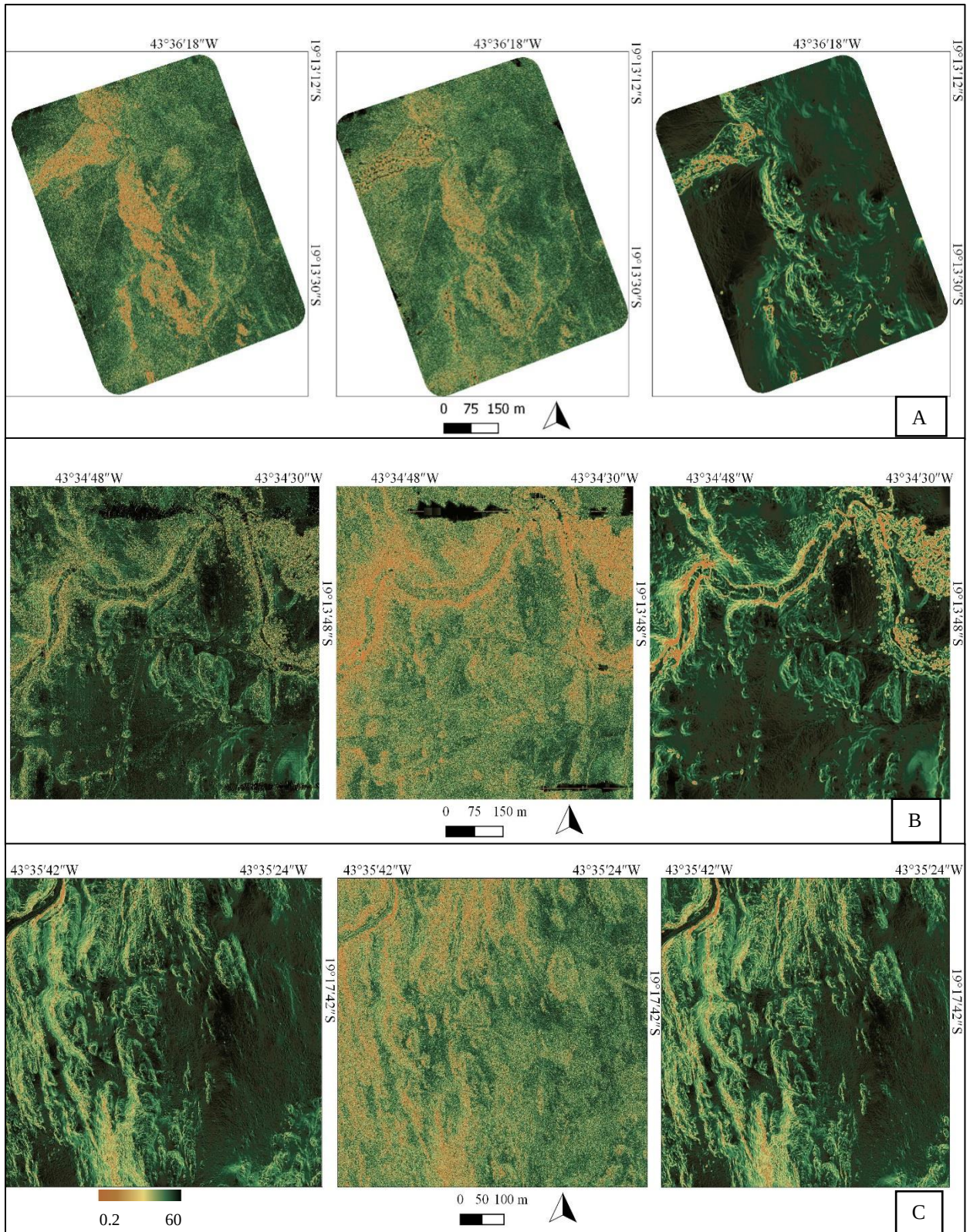


Figura 41. Declividade geradas nos diferentes MDSs e MDTs das três áreas imageadas. Na sequência, em “A” o MDS, o MDT filtrado com o método de nuvem de pontos e o MDT filtrado com o método *raster* da Área 1, em “B” o MDS, o MDT filtrado com o método de nuvem de pontos e o MDT filtrado com o método *raster* da Área 2 e em “C” o MDS, o MDT filtrado com o método de nuvem de pontos e o MDT filtrado com o método *raster* da Área 3.

Outra conotação que deve ser lembrada nesse estudo é que os algoritmos realizados nesta dissertação são voltados para nuvem de pontos adquiridas por sensores LiDAR, que difere nas nuvens de pontos realizadas por VANTs devido ter diferentes números de retornos em sua aquisição de imageamento. Podemos identificar que as filtrações foram realizadas de forma efetiva, porém observou-se algumas limitações quanto a regiões onde se observou vegetações mais densas e homogêneas. A ausência de valores de chão nestas áreas de dosséis homogêneos dificulta o entendimento dos algoritmos na distinção e compreensão efetiva das declividades existentes no terreno, como visto principalmente nas áreas próximas a mananciais e rios realizadas nos imageamentos. Estas limitações também podem ocorrer com dados do sensor LiDAR por uma dificuldade de entendimentos dos algoritmos de nuvem de pontos, observações também foram apresentadas em estudos como em áreas com vegetações homogêneas como campos de cana-de-açúcar (DE SOUZA et al., 2017), de áreas com vegetações mais densas de florestas tropicais (KHAN; ARAGÃO; IRIARTE, 2017), áreas com erros de estimativas de biomassa (BEN-ARIE et al., 2009), entre outros.

A comunidade científica tem utilizado cada vez dados topográficos obtidos por VANTS, principalmente a de reconstrução de modelos digitais de superfície pelos algoritmos de visão computacional em especial o *Structure-from-Motion*, nas mais diferentes frentes e linhas de atuação. Pesquisas relacionadas a processos hidrológicos tem despontado principalmente com as facilidades do uso com o SfM, assim como de monitoramento das zonas costeiras (GONÇALVES; HENRIQUES, 2015), de monitoramento das áreas com maiores movimentos de massa (ADAMS; FROMM; LECHNER, 2016), monitoramento de biomassa (MLAMBO et al., 2017), arcabouços arqueológicos (VERHOEVEN, 2016) entre outros. O aprimoramento das técnicas de geração destas nuvens de pontos, assim como suas reconstruções e processos de filtrações e interpolações são de grande valia científica para inúmeras áreas de pesquisas, sendo cada vez mais motivadores estudos que possam corroborar e adicionar novos auxílios a pesquisas de diferentes áreas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação dos métodos descritos nos mostra que a representação da superfície do terreno pode ser adequada em uma região de relevo montanhoso e vegetação esparsa e baixa, como a encontrada nas diferentes áreas de estudo. Porém, pode-se notar que o filtro *DTMfilter*, juntamente com o interpolador *Multilevel B-Spline*, suavizaram demais as áreas, perdendo algumas informações importantes quanto às microformas, que podem ser interessantes dependendo o método de estudo a ser aplicado. Na filtragem pelo algoritmo *Mcc-LiDAR* usando o interpolador *Splines Regulares com Tensão* (RST), os Modelos Digitais de Terreno gerados conseguiram reconstruir as feições do terreno de forma mais detalhada, ou, dependendo do ponto de vista, mais ruidosa. Deve-se salientar que a escolha do interpolador para a reconstrução dos processamentos de filtragens é uma decisão a ser tomada segundo a escala de análise do respectivo usuário dos dados, assim como o objetivo de sua utilização. E lembrar também que depende do tempo de processamento que se tem disponível para a realização destes métodos, e processadores computacionais eficientes que colaborem com a execução destas metodologias.

O efeito da filtragem e suavização sobre o modelo digital de superfície é notável, principalmente em regiões planas ou áreas cujo relevo é demasiadamente acidentado, onde o método computacional utilizando o algoritmo *DTM-filter* apresentou melhor eficácia. A qualidade final dos modelos digitais de terreno (MDTs) depende principalmente da resolução espacial utilizada, e dos parâmetros das filtragens usados, os quais dever ser otimizados para cada tipo de aplicação. A resolução espacial indicada para a realização dos modelos de terreno também deve ser levada em consideração. O tamanho do pixel é uma idealização relativa a necessidade do objetivo principal do projeto a ser executado (HENGL, 2006). Não existe um tamanho de pixel ideal absoluto, com certeza. Deveria pelo menos tentar evitar o uso de resoluções que não cumpram as propriedades inerentes aos conjuntos de dados de entrada.

Para se obter modelos digitais de terreno que levem em conta as microformas e micro feições, assim como o entendimento da vegetação, deve-se usar interpoladores que preservem mais as feições do terreno real, como as vegetações que ficam entre os entremeios dos afloramentos rochosos muito presentes na área de estudo em questão. Para estes usos seria mais indicado o uso do interpolador *Splines Regulares com Tensão*. Modelos digitais de terreno gerados com interpoladores que suavizam mais a paisagem, como no caso do interpolador *B-Spline* de modo *Bicubico*, são mais utilizados em dados onde um número maior de feições no

terreno podem atrapalhar a compreensão de dinâmicas terrestres, como no caso da geração de modelos hidrológicos e geomorfológicos, onde as microfeições podem prejudicar a reconstrução dos caminhos de movimentos hidrológicos ou tendências de inclinação do relevo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 4^a ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2007.
- ADAMS, M. S.; FROMM, R.; LECHNER, V. High-resolution debris flow volume mapping with unmanned aerial systems (UAS) and photogrammetric techniques. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 2016–Janua, n. July, p. 749–755, 2016.
- ANDERS, N. et al. High-Res Digital Surface Modeling using Fixed-Wing UAV-based Photogrammetry. **Geomorphometry** 2013, p. 2–5, 2013.
- ANDERSEN, H.-E.; MCGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S. E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 441–449, fev. 2005.
- ANDERSON, K.; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 3, p. 138–146, 2013.
- BAY, H. et al. Speeded-Up Robust Features (SURF). **Computer Vision and Image Understanding**, v. 110, n. 3, p. 346–359, 2008.
- BEN-ARIE, J. R. et al. Development of a pit filling algorithm for LiDAR canopy height models. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 9, p. 1940–1949, set. 2009.
- BENITES, V. M. et al. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 4, p. 569–577, 2007.
- BROVELLI, M. A.; LUCCA, S. Comparison of GRASS-LiDAR modules-TerraScan with respect to vegetation filtering. **Applied Geomatics**, v. 4, n. 2, p. 123–134, 2012.
- BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. **Geocarto International**, v. 1, n. 3, p. 54–54, 1986.
- CAMARGO, E.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Cap 3 - Análise espacial de superfícies por geoestatística linear. **Análise Espacial de Dados Geográficos**, p. 37, 2004.
- CARVALHO, J. R. P. DE; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1235–1242, 2012.
- CHEN, C. et al. A robust interpolation method for constructing digital elevation models from remote sensing data. **Geomorphology**, v. 268, p. 275–287, 2016.
- CLAPUYT, F.; VANACKER, V.; OOST, K. VAN. Reproducibility of UAV-based earth

- topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. v. 260, p. 4–15, 2016.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014a.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014b.
- COOK, K. L. Geomorphology An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. **Geomorphology**, v. 278, p. 195–208, 2017.
- CROMMELINCK, S. et al. Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, 2016.
- DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1157–1176, 2010.
- DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 259–276, 2013a.
- DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 259–276, 2013b.
- DE SOUZA, C. H. W. et al. Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. **International Journal of Remote Sensing**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2017.
- EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 94–106, 2012a.
- EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 94–106, 2012b.
- EVANS, J. S.; HUDAK, A. T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 4, p. 1029–1038, 2007.
- FELGUEIRAS, C. A. Modelo Numérico de Terreno. **Dados**, p. 1–39, 1986.
- FELIPPE, M. F. et al. Caracterização Morfométrica dos Compartimentos do Relevo do Parque Nacional da Serra do Cipó , Serra do Espinhaço Meridional – Minas Gerais. v. 1, n. 1, p. 3–14,

2012.

FERNANDES, G. W. **Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

FLORINSKY, I. V.; KURYAKOVA, G. A. Influence of topography on some vegetation cover properties. **Catena**, v. 27, n. 2, p. 123–141, 1996.

FOREST, B.; PARK, N. 3D Landscape Metrics To Modelling Forest Structure and Diversity. **Sustainable Development**, v. 36, p. 129–132, 2004.

GAGO, J. et al. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 153, p. 9–19, maio 2015.

GIULIETTI, A. M. et al. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: Caracterização e lista das espécies. **Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo**, v. 9, n. May, p. 1–151, 1987.

GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 104, p. 101–111, 2015.

GONTIJO, B. M. Uma geografia para a Cadeia do Espinhaço. **Megadiversidade**, v. 4, n. 1–2, p. 7–15, 2008.

GROHMANN, C. H. Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas à Análise Morfométrica. p. 78, 2004.

GROHMANN, C. H.; STEINER, S. S. SRTM resample with short distance-low nugget kriging. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 8, p. 895–906, 2008.

GUPTA, S. G.; GHONGE, M. M. Review of Unmanned Aircraft System (UAS). v. 2, n. 4, p. 1646–1658, 2013.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers and Geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1283–1298, 2006.

HENGL, T.; EVANS, I. S. Mathematical and digital models of the land surface. In: **Developments in Soil Science**. [s.l: s.n.]. v. 33p. 31–63.

HLADIK, C.; ALBER, M. Accuracy assessment and correction of a LIDAR-derived salt marsh digital elevation model. **Remote Sensing of Environment**, v. 121, p. 224–235, 2012.

HUGGETT, R.; CHEESMAN, J. **Topography and the environment**. [s.l: s.n.].

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia 2ª edição**. [s.l: s.n.].

JAVERNICK, L.; BRASINGTON, J.; CARUSO, B. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. **Geomorphology**, v. 213, p. 166–182, maio 2014.

- JELASKA, S. D. Vegetation Mapping Applications. **Geomorphometry**, v. 33, n. 8, p. 481–496, 2009.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. [s.l: s.n.]. v. 21
- KHAN, S.; ARAGÃO, L.; IRIARTE, J. A UAV – lidar system to map Amazonian rainforest and its ancient landscape transformations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2017.
- LE STRADIC, S. Composition , phenology and restoration of campo rupestre mountain grasslands - Brazil. p. 265, 2012.
- LEE, S.; WOLBERG, G.; SHIN, S. Y. Scattered data interpolation with multilevel b-splines. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 3, n. 3, p. 228–244, 1997.
- LI, J.; WONG, D. W. S. Effects of DEM sources on hydrologic applications. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, n. 3, p. 251–261, 2010.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. M. **Digital terrain modelling. Principles and methodology**. [s.l: s.n.].
- LIN, Z. ZHU, Q., GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. [s.l: s.n.]. v. 19
- LIU, X.; ZHANG, Z. The effect of LiDAR data density on DEM accuracy. **MODSIM07: International Congress on Modelling and Simulation: Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability**, p. 1363–1369, 2007.
- LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.
- LUCIEER, A. et al. Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to capture micro-topography of antarctic moss beds. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 27, n. PARTA, p. 53–62, 2014.
- MEGURO, M. et al. **Caracterização florística e estrutural de matas ripárias e capões de altitude da Serra do Cipó, Minas Gerais** Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo, 1996.
- MENEZES, N. L. D. E.; MEGURO, M. Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo, v. 9, n. May, p. 1–151, 2015.
- MENG, X.; CURRIT, N.; ZHAO, K. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. **Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 833–860, 2010.
- MICELI, B. S. et al. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes

- configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 1, p. 191–201, 2011.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. [s.l.] Wiley, 2001.
- MITASOVA, H.; MITAS, L.; HARMON, R. S. Simultaneous Spline Interpolation and Topographic Analysis for LIDAR Elevation Data: Methods for Open Source GIS. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 4, p. 375–379, 2005.
- MLAMBO, R. et al. Structure from motion (SfM) photogrammetry with drone data: A low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. **Forests**, v. 8, n. 3, 2017.
- NETELER, M.; MITASOVA, H. **Open source GIS: A GRASS GIS approach**. [s.l.: s.n.].
- NETELER, M.; MITASOVA, H. **Open Source GIS**. Boston, MA: Springer US, 2008b. v. 2
- NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: a review. **Applied Geomatics**, v. 6, p. 1–15, 2013.
- PAPARODITIS, N.; POLIDORI, L. Generation of digital terrain and surface models. In: MICHEL KASSER AND YVES EGELS (Ed.). **Digital Photogrammetry**. London: Taylor & Francis, 2002.
- PAPER, C. et al. Review of interpolation methods for point cloud modelling in coordinate metrology. n. April, 2014.
- PETRAS, V. et al. Processing UAV and LiDAR point clouds in grass GIS. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 41, n. July, p. 945–952, 2016.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**. [s.l.: s.n.]. v. 33
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. **Geomorphometry: A brief guide**. [s.l.: s.n.]. v. 33
- PIRANI, J. R. . et al. **Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais**, 2015. Disponível em: <<http://www.ib.usp.br/botanica/serradocipo>>
- PIROTTI, F.; TAROLLI, P. Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 9, p. 1187–1197, 2010.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: Local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, n. 1–3, p. 71–95, 2003.
- PROGRAMME, I. H. Modelling erosion , sediment transport and sediment yield. n. 60, 2002.

- RAPINI, A. et al. A flora dos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço. **Megadiversidade**, v. 4, p. 16–24, 2008.
- REMONDINO, F. et al. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII, n. September, p. 14–16, 2011.
- REMONDINO, F. et al. Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII-1/, n. September, p. 25–31, 2012.
- REMONDINO, F. et al. State of the art in high density image matching. **The Photogrammetric Record**, v. 29, n. 146, p. 144–166, 2014a.
- REMONDINO, F. et al. State of the art in high density image matching. **The Photogrammetric Record**, v. 29, n. 146, p. 144–166, 2014b.
- RESENDE, M.; GUIMARÃES, L. Inventários da biodiversidade do bioma Cerrado: biogeografia de plantas. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, p. 1–14, 2007.
- SAADI, A. a Geomorfologia Da Serra Do Espinhaço Em Minas Gerais E De Suas Margens. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 41–63, 1995.
- SANTISE, M. et al. Evaluation of dem generation accuracy from UAS imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 40, n. 5, p. 529–536, 2014.
- SANTOS, M. F.; SERAFIM, H.; SANO, P. T. Fisionomia e composição da vegetação florestal na Serra do Cipó, MG, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 4, p. 793–814, 2011.
- SCHONBERGER, J. L.; FRAHM, J.-M. **Structure-from-Motion Revisited**. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). **Anais...2016**
- SCHONBERGER, J. L.; FRAUNDORFER, F.; FRAHM, J. M. **Structure-from-motion for MAV image sequence analysis with photogrammetric applications**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. **Anais...2014**
- SHAPIRO, L.; STOCKMAN, G. Computer Vision. **October**, v. 2004, n. October, p. 608, 2001.
- SIEBERT, S.; TEIZER, J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. **Automation in Construction**, v. 41, p. 1–14, 2014.
- SILVEIRA, F. A. O. et al. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. **Plant and Soil**, v. 403, n. 1–2, p. 129–152, 2016.
- SITHOLE, G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. **International**

Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XXXIV, n. (Pt. 3/W4), p. 203–210, 2001.

SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59, n. 1–2, p. 85–101, ago. 2004.

SNAVELY, N. Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections: A Survey. **IPSP Transactions on Computer Vision and Applications**, v. 3, p. 44–66, 2011.

SOBREIRO, J. F. F.; SILVA, T. S. F.; STREHER, A. S. **Avaliação multi-escala do regime de precipitação da Cadeia do Espinhaço Meridional (Brasil)**. Congresso de Iniciação Científica da Unesp. **Anais...**2015

SØRENSEN, R.; SEIBERT, J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. **Journal of Hydrology**, v. 347, n. 1–2, p. 79–89, 2007.

TAI, D. W. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. [s.l: s.n.].

TONKIN, T. N. et al. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. **Geomorphology**, v. 226, p. 35–43, dez. 2014.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1392–1410, 2012a.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 1392–1410, 14 maio 2012b.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; WATSON, C. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 1392–1410, 14 maio 2012c.

VALENTE, E. L. Relação solo-vegetação no parque nacional da Serra do Cipó, espinhaço meridional, Minas Gerais. p. 138, 2009.

VERHOEVEN, G. J. Mesh Is More???Using All Geometric Dimensions for the Archaeological Analysis and Interpretative Mapping of 3D Surfaces. **Journal of Archaeological Method and Theory**, v. 35, p. 1–35, 2016.

- VOSSELMAN, G. Slope based filtering of laser altimetry data. **Iaprs** **2000**, v. XXXIII, p. 1–8, 2000.
- VOSSELMAN, G. et al. Recognising structure in laser scanner point clouds. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, p. 33–38, 2004.
- WALLACE, L. et al. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1519–1543, 2012.
- WALLACE, L.; WATSON, C.; LUCIEER, A. Detecting pruning of individual stems using Airborne Laser Scanning data captured from an Unmanned Aerial Vehicle. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 30, p. 76–85, 2014.
- WANG, Z. et al. Research on the Application of Ground-Based Optical Image for Slope Rapid Monitoring. n. 41271013, p. 6121–6124, 2016.
- WESTOBY, M. J. et al. “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012.
- WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 107–121, 2012.
- WISE, S. M. Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model. **Computers and Geosciences**, v. 33, n. 10, p. 1351–1365, 2007.
- XIAOYE LIU. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 1, p. 31–49, 2008.
- ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation. **Water Resour. Res.**, v. 30, n. 4, p. 101, 1994.

ANEXO 1 – Tabelas de dados de campo das três áreas

Nome	Longitude	Latitude	Altura_m	N_Foto	amera	Veg1	Veg2	Veg3	Altura média da vegetação	observação
1	43° 36' 13.81922"W	19° 13' 23.31800"S	1294.50	2035	Nikon	0.28	0.36	0.25	0.297	
2	43° 36' 13.42812"W	19° 13' 21.34105"S	1296.10	2036	Nikon	0.44	0.39	0.3	0.377	
3	43° 36' 13.53036"W	19° 13' 19.66553"S	1301.23	2037	Nikon	0.41	0.37	0.32	0.367	
4	43° 36' 13.03225"W	19° 13' 17.43199"S	1309.87	2038	Nikon	0.61	0.39	0.4	0.467	ALVO - Topo do morro
5	43° 36' 14.85209"W	19° 13' 17.96101"S	1303.38	2039	Nikon	0.56	0.46	0.43	0.483	
6	43° 36' 16.87864"W	19° 13' 18.51376"S	1291.89	2040	Nikon	0.48	0.39	0.38	0.417	
7	43° 36' 19.44691"W	19° 13' 20.80964"S	1278.12	2041	Nikon	0.37	0.28	0.33	0.327	ALVO - Vellozia
8	43° 36' 19.08753"W	19° 13' 23.03767"S	1270.28	2042	Nikon	1.22	1.23	1.18	1.210	
9	43° 36' 17.38742"W	19° 13' 23.48535"S	1273.60	2043	Nikon	0.55	0.57	0.5	0.540	
10	43° 36' 16.69003"W	19° 13' 23.42215"S	1280.14	2044	Nikon	0.4	0.69	0.4	0.497	
11	43° 36' 15.42693"W	19° 13' 22.33397"S	1285.07	2045	Nikon	0.39	0.34	0.4	0.377	
12	43° 36' 14.00450"W	19° 13' 24.91599"S	1287.85	2046	Nikon	0.43	0.37	0.48	0.427	Curvatura
13	43° 36' 15.05843"W	19° 13' 24.73971"S	1282.22	2047	Nikon	0.35	0.56	0.68	0.530	ALVO - decolagem
14	43° 36' 14.45576"W	19° 13' 26.58572"S	1280.53	2049	Nikon	0.61	0.7	0.36	0.557	
15	43° 36' 15.09954"W	19° 13' 28.11634"S	1267.24	2050	Nikon	2.33	2.66	1.53	2.173	
16	43° 36' 16.17544"W	19° 13' 29.03782"S	1263.64	2051	Nikon	0.94	1.24	0.97	1.050	
17	43° 36' 17.03742"W	19° 13' 30.73129"S	1254.12	2052	Nikon	0.74	0.66	0.43	0.610	
18	43° 36' 18.81797"W	19° 13' 29.02300"S	1256.02	2053	Nikon	2.34	1.79	1.7	1.943	
19	43° 36' 19.11471"W	19° 13' 27.06331"S	1259.49	2054	Nikon	0.49	0.75	0.9	0.713	
20	43° 36' 17.74219"W	19° 13' 26.68952"S	1271.05	2055	Nikon	0.44	0.41	0.51	0.453	
21	43° 36' 18.69663"W	19° 13' 25.34238"S	1269.76	2056	Nikon	1.69	3.26	2.29	2.413	
22	43° 36' 19.92486"W	19° 13' 26.54760"S	1257.55	2057	Nikon	0.46	0.45	0.49	0.467	
23	43° 36' 21.21865"W	19° 13' 26.87930"S	1257.29	2058	Nikon	1.19	1.64	1.42	1.417	
24	43° 36' 21.34936"W	19° 13' 26.33401"S	1256.04	2059	Nikon	0.49	0.5	0.82	0.603	
25	43° 36' 21.54226"W	19° 13' 25.42136"S	1263.29	2060	Nikon	1.66	1.85	1.88	1.797	
26	43° 36' 22.04511"W	19° 13' 23.82599"S	1272.57	2061	Nikon	1.92	1.98	1.78	1.893	
27	43° 36' 22.44885"W	19° 13' 22.22616"S	1271.38	2063	Nikon	1.86	1.22	0.91	1.330	

28	43° 36' 23.08872"W	19° 13' 21.65589"S	1265.86	2064	Nikon	1.76	1.32	1.54	1.540	
29	43° 36' 22.66315"W	19° 13' 19.84960"S	1258.54	2065	Nikon	0.52	0.39	0.73	0.547	
30	43° 36' 24.77321"W	19° 13' 18.70690"S	1249.21	2066	Nikon	0	0	0	0.000	ALVO - Porteira Floresta
31	43° 36' 25.11709"W	19° 13' 17.67430"S	1251.79	2067	Nikon	8.6	6.8	8.8	8.067	
32	43° 36' 26.31717"W	19° 13' 17.11130"S	1249.75	2068	Nikon	4	3.2	3.2	3.467	
33	43° 36' 27.19489"W	19° 13' 17.37772"S	1243.33	2069	Nikon	2.7	2.54	2.02	2.420	
34	43° 36' 25.41534"W	19° 13' 18.17275"S	1246.48	2070	Nikon	7	8	10	8.333	
35	43° 36' 25.74103"W	19° 13' 18.18862"S	1242.62	2072	Nikon	8	10	15	11.000	
36	43° 36' 26.09092"W	19° 13' 20.58837"S	1243.79	2074	Nikon	0.57	0.76	0.98	0.770	
37	43° 36' 25.39466"W	19° 13' 22.21555"S	1247.98	2075	Nikon	0.65	0.53	0.41	0.530	ALVO - Curva
38	43° 36' 27.43697"W	19° 13' 22.24244"S	1244.03	2076	Nikon	2.32	3.2	3.2	2.907	
39	43° 36' 23.92776"W	19° 13' 22.98371"S	1251.52	2078	Nikon	1.75	2.06	2.07	1.960	
40	43° 36' 25.74201"W	19° 13' 24.74653"S	1246.66	2079	Nikon	0.39	0.36	0.43	0.393	
41	43° 36' 22.84917"W	19° 13' 26.28957"S	1248.10	2080	Nikon	0	0	0	0.000	Queimada
42	43° 36' 24.58166"W	19° 13' 27.79962"S	1244.15	2081	Nikon	0	0	0	0.000	Queimada
43	43° 36' 26.65411"W	19° 13' 31.25233"S	1240.05	2082	Nikon	0.21	0.27	0.24	0.240	
44	43° 36' 29.24402"W	19° 13' 29.80426"S	1232.64	2083	Nikon	14.6	17.4	18.8	16.933	
45	43° 36' 25.64519"W	19° 13' 31.81172"S	1236.49	2084	Nikon	0	0	0	0.000	ALVO - Pastinho
46	43° 36' 24.60102"W	19° 13' 31.20630"S	1235.58	2086	Nikon	0.21	0.29	0.24	0.247	
47	43° 36' 23.33401"W	19° 13' 30.46346"S	1233.40	2087	Nikon	0.11	0.17	0.21	0.163	
48	43° 36' 22.55473"W	19° 13' 30.31057"S	1230.01	2089	Nikon	2.09	1.83	2.02	1.980	
49	43° 36' 22.01774"W	19° 13' 31.26395"S	1234.07	2090	Nikon	0.29	0.24	0.23	0.253	
50	43° 36' 20.87520"W	19° 13' 31.72986"S	1244.04	2091	Nikon	1.57	2.3	1.28	1.717	
51	43° 36' 21.58147"W	19° 13' 32.88719"S	1233.39	2092	Nikon	0.69	0.4	0.31	0.467	
52	43° 36' 22.92297"W	19° 13' 33.04576"S	1223.81	2093	Nikon	6	7	8	7.000	
53	43° 36' 26.24791"W	19° 13' 33.72610"S	1238.41	2094	Nikon	0.21	0.17	0.16	0.180	
54	43° 36' 27.11233"W	19° 13' 31.96319"S	1238.47	2095	Nikon	0	0	0	0.000	Estrada
55	43° 36' 28.34269"W	19° 13' 24.95197"S	1240.86	2096	Nikon	0.6	1.49	1.11	1.067	

56	43° 36' 22.75207"W	19° 13' 17.73385"S	1263.04	2097	Nikon	0.6	0.5	0.4	0.500	
57	43° 36' 21.78395"W	19° 13' 16.89716"S	1272.64	2098	Nikon	0.45	0.5	0.6	0.517	
58	43° 36' 20.90492"W	19° 13' 17.60499"S	1274.48	2099	Nikon	1.2	0.7	0.8	0.900	
59	43° 36' 19.20050"W	19° 13' 18.39099"S	1279.99	2100	Nikon	0.55	0.7	0.6	0.617	
60	43° 36' 18.07758"W	19° 13' 17.20019"S	1286.92	2101	Nikon	0.4	0.55	0.3	0.417	
61	43° 36' 16.35310"W	19° 13' 17.57810"S	1297.10	2102	Nikon	0.35	0.4	0.45	0.400	
62	43° 36' 15.31973"W	19° 13' 19.54321"S	1295.17	2103	Nikon	0.6	0.4	0.4	0.467	
63	43° 36' 14.55881"W	19° 13' 20.78533"S	1293.48	2104	Nikon	0.3	0.4	0.75	0.483	
64	43° 36' 17.05707"W	19° 13' 21.78273"S	1280.75	2105	Nikon	0.4	0.55	0.4	0.450	
65	43° 36' 17.59570"W	19° 13' 20.38115"S	1284.02	2106	Nikon	0	0	0	0.000	Estrada
66	43° 36' 12.20115"W	19° 13' 21.34620"S	1298.62	2107	Nikon	0.4	0.25	0.45	0.367	
67	43° 36' 12.53051"W	19° 13' 23.33533"S	1294.25	2108	Nikon	0.4	0.5	0.5	0.467	
68	43° 36' 12.94333"W	19° 13' 24.82191"S	1291.07	2109	Nikon	0.15	0.31	0.3	0.253	
69	43° 36' 13.04510"W	19° 13' 25.87188"S	1283.30	2110	Nikon	0.35	0.3	0.45	0.367	
70	43° 36' 15.80497"W	19° 13' 25.84436"S	1278.00	2111	Nikon	0.3	0.4	0.7	0.467	
71	43° 36' 16.08532"W	19° 13' 26.93853"S	1274.26	2112	Nikon	0.55	0.35	0.4	0.433	
72	43° 36' 17.43752"W	19° 13' 27.61743"S	1266.40	2113	Nikon	0.65	0.4	0.45	0.500	
73	43° 36' 17.58999"W	19° 13' 28.79544"S	1260.19	2114	Nikon	0.6	0.4	0.25	0.417	
74	43° 36' 20.01638"W	19° 13' 28.46237"S	1253.28	2115	Nikon	2.1	2.3	2.2	2.200	
75	43° 36' 19.23058"W	19° 13' 29.44388"S	1249.45	2116	Nikon	2.4	1.5	1	1.633	
76	43° 36' 20.56502"W	19° 13' 28.97532"S	1243.69	2117	Nikon	0	0	0	0.000	Queimada
77	43° 36' 22.02498"W	19° 13' 28.75714"S	1241.27	2119	Nikon	0	0	0	0.000	Queimada
78	43° 36' 23.14719"W	19° 13' 27.94559"S	1242.02	2120	Nikon	0.3	0.15	0.15	0.200	
79	43° 36' 23.60480"W	19° 13' 29.09545"S	1238.73	2121	Nikon	0.05	0.2	0.1	0.117	
80	43° 36' 24.98297"W	19° 13' 29.51353"S	1241.12	2122	Nikon	0.1	0.05	0.05	0.067	
81	43° 36' 26.76167"W	19° 13' 29.52375"S	1240.44	2123	Nikon	0	0	0	0.000	Estrada

Área 2 – Cedro

Nome	Long	Lat	nº da foto	camera	Veg1	Veg 2	Veg 3	Altura média da vegetação	observação
1	43° 34' 45.35702"W	19° 13' 56.83712"S	2006	nikon	0.69	0.57	0.74	0.67	
2	43° 34' 46.48787"W	19° 13' 56.98710"S	2001	nikon	0.95	0.77	0.64	0.79	
3	43° 34' 46.38684"W	19° 13' 57.48276"S	2002	nikon	0.81	0.69	0.66	0.72	
4	43° 34' 47.17858"W	19° 13' 57.58534"S	1998	nikon	0.70	0.96	1.11	0.92	
5	43° 34' 48.40504"W	19° 13' 57.76144"S	1994	nikon	0.49	0.52	0.39	0.47	
6	43° 34' 49.67067"W	19° 13' 58.10369"S	1990	nikon	0.78	0.79	0.91	0.83	
7	43° 34' 50.46666"W	19° 13' 57.66790"S	1989	nikon	0.92	1.24	0.92	1.03	
8	43° 34' 51.83906"W	19° 13' 58.98056"S	1980	nikon	0.82	0.85	0.79	0.82	
9	43° 34' 53.38182"W	19° 13' 58.76823"S	1978	nikon	1.49	1.74	1.44	1.56	
10	43° 34' 54.85981"W	19° 13' 59.42288"S	1975	nikon	0.53	0.74	0.59	0.62	
11	43° 34' 55.86959"W	19° 13' 59.84833"S	1972	nikon	0.67	0.65	0.69	0.67	
12	43° 34' 55.80353"W	19° 13' 57.85445"S	1973	nikon	0.29	0.45	0.47	0.40	
13	43° 34' 54.38448"W	19° 13' 58.92082"S	1976	nikon	1.28	1.12	1.51	1.30	
14	43° 34' 53.79964"W	19° 13' 59.41632"S	1974	nikon	1.16	1.05	0.93	1.05	
15	43° 34' 53.81501"W	19° 14' 00.17961"S	1977	nikon	0.63	0.52	0.47	0.54	
16	43° 34' 53.29127"W	19° 14' 00.42160"S	1979	nikon	1.71	0.78	0.51	1.00	
17	43° 34' 52.80465"W	19° 14' 00.78385"S	1982	nikon	1.39	1.62	1.22	1.41	
18	43° 34' 52.90584"W	19° 14' 01.58213"S	1987	nikon	0.42	0.43	0.49	0.45	
19	43° 34' 52.13413"W	19° 14' 00.87982"S	1984	nikon	0.51	0.44	0.45	0.47	
20	43° 34' 51.48888"W	19° 14' 01.21181"S	1986	nikon	0.00	0.00	0.00	0.00	ravina
21	43° 34' 51.20430"W	19° 14' 01.02080"S	1981	nikon	0.51	0.56	0.64	0.57	
22	43° 34' 50.70404"W	19° 13' 59.93138"S	1983	nikon	0.99	0.86	1.03	0.96	
23	43° 34' 50.46473"W	19° 14' 00.96696"S	1988	nikon	0.88	0.94	0.92	0.91	
24	43° 34' 49.80133"W	19° 14' 00.86712"S	1991	nikon	1.34	1.37	1.09	1.27	

25	43° 34' 48.13355"W	19° 13' 57.03380"S	1995	nikon	0.71	0.90	0.89	0.83	
26	43° 34' 47.55282"W	19° 13' 55.57264"S	2000	nikon	0.85	0.48	0.38	0.57	
27	43° 34' 46.91676"W	19° 13' 52.90724"S	2007	nikon	0.99	1.02	0.88	0.96	
28	43° 34' 46.06781"W	19° 13' 52.18745"S	2012	nikon	0.97	0.88	0.72	0.86	
29	43° 34' 44.95086"W	19° 13' 52.13638"S	2011	nikon	0.82	1.04	0.79	0.88	
30	43° 34' 45.03953"W	19° 13' 51.00055"S	2014	nikon	0.48	0.52	0.35	0.45	ALVO - Bruna
31	43° 34' 44.75883"W	19° 13' 50.34818"S	2021	nikon	2.66	2.72	2.76	2.71	
32	43° 34' 44.22757"W	19° 13' 50.10331"S	2020	nikon	1.61	1.53	2.80	1.98	
33	43° 34' 43.24505"W	19° 13' 51.00889"S	2017	nikon	2.63	2.33	3.90	2.95	
34	43° 34' 42.57228"W	19° 13' 51.01849"S	2023	nikon	1.34	1.32	1.39	1.35	
35	43° 34' 42.02855"W	19° 13' 51.67424"S	2022	nikon	2.92	2.89	3.10	2.97	
36	43° 34' 41.30713"W	19° 13' 52.11357"S	s/foto	s/foto	1.10	0.50	0.70	0.77	
37	43° 34' 40.69804"W	19° 13' 52.49534"S	2032	nikon	0.30	0.42	0.39	0.37	
38	43° 34' 39.38159"W	19° 13' 52.17957"S	s/foto	s/foto	1.00	1.45	0.70	1.05	
39	43° 34' 38.91854"W	19° 13' 51.08854"S	s/foto	s/foto	0.90	1.10	0.80	0.93	
40	43° 34' 37.64499"W	19° 13' 50.90802"S	2033	nikon	1.90	0.90	0.95	1.25	
41	43° 34' 35.15564"W	19° 13' 48.59703"S	s/foto	s/foto	0.45	0.70	0.65	0.60	
42	43° 34' 37.21111"W	19° 13' 47.74914"S	s/foto	s/foto	0.60	1.00	0.55	0.72	
43	43° 34' 38.05172"W	19° 13' 48.93319"S	105-004	canon	4.50	4.50	2.00	3.67	
44	43° 34' 33.80579"W	19° 13' 48.15090"S	2031	nikon	0.00	0.00	0.00	0.00	ALVO - Morro Branco
45	43° 34' 33.26909"W	19° 13' 48.91752"S	2025	nikon	0.80	0.66	0.73	0.73	
46	43° 34' 32.37369"W	19° 13' 48.93146"S	2015	nikon	0.49	0.57	1.08	0.71	
47	43° 34' 32.85287"W	19° 13' 49.65152"S	2016	nikon	1.77	1.82	2.31	1.97	
48	43° 34' 32.88900"W	19° 13' 50.40102"S	2019	nikon	1.12	0.89	0.97	0.99	
49	43° 34' 33.28487"W	19° 13' 50.67152"S	2026	nikon	2.47	2.51	2.39	2.46	
50	43° 34' 34.16114"W	19° 13' 50.79194"S	2027	nikon	1.77	1.64	1.24	1.55	
51	43° 34' 33.52806"W	19° 13' 51.88063"S	2024	nikon	1.67	1.72	1.51	1.63	
52	43° 34' 33.05652"W	19° 13' 53.45105"S	2030	nikon	1.20	1.12	0.70	1.01	

53	43° 34' 32.73821"W	19° 13' 54.47608"S	105-006	canon	0.80	1.60	0.50	0.97	
54	43° 34' 32.62825"W	19° 13' 55.58958"S	105-007	canon	0.60	0.70	0.60	0.63	
55	43° 34' 32.94590"W	19° 13' 56.80144"S	s/foto	s/foto	1.60	1.55	0.90	1.35	
56	43° 34' 33.00809"W	19° 13' 58.15892"S	105-008	canon	0.90	1.30	0.95	1.05	
57	43° 34' 31.61429"W	19° 13' 59.15961"S	105-010	canon	0.90	0.80	0.50	0.73	
58	43° 34' 30.66683"W	19° 13' 59.31999"S	105-011	canon	0.00	0.00	0.00	0.00	ALVO - Km1
59	43° 34' 30.01060"W	19° 14' 01.42523"S	105-018	canon	0.60	0.80	0.65	0.68	
60	43° 34' 32.30055"W	19° 14' 03.44886"S	105-019	canon	0.75	1.50	0.65	0.97	
61	43° 34' 33.09798"W	19° 14' 04.82641"S	105-017	canon	0.70	1.00	0.50	0.73	
62	43° 34' 33.68928"W	19° 14' 05.90684"S	105-016	canon	0.80	0.50	0.60	0.63	
63	43° 34' 34.41464"W	19° 14' 06.45757"S	105-015	canon	0.85	1.30	2.00	1.38	
64	43° 34' 34.71909"W	19° 14' 07.47856"S	105-014	canon	1.30	1.15	0.80	1.08	
65	43° 34' 34.68768"W	19° 14' 07.96535"S	105-013	canon	1.00	2.50	2.00	1.83	
66	43° 34' 35.68802"W	19° 14' 08.27414"S	105-009	canon	0.95	1.70	0.85	1.17	
67	43° 34' 36.40802"W	19° 14' 07.72731"S	105-003	canon	0.80	0.90	0.95	0.88	
68	43° 34' 37.36169"W	19° 14' 07.60044"S	2034	nikon	0.45	0.60	0.40	0.48	
69	43° 34' 38.70909"W	19° 14' 06.63872"S	2028	nikon	0.97	0.93	1.12	1.01	
70	43° 34' 36.71225"W	19° 14' 04.29009"S	105-005	canon	0.60	1.50	1.35	1.15	
71	43° 34' 37.86312"W	19° 14' 03.53697"S	s/foto	s/foto	0.70	0.65	0.70	0.68	campo rupestre
72	43° 34' 38.64646"W	19° 14' 02.97853"S	2029	nikon	0.50	0.35	0.33	0.39	
73	43° 34' 39.38681"W	19° 14' 02.05888"S	2018	nikon	1.80	1.46	1.11	1.46	
74	43° 34' 41.20866"W	19° 14' 01.16208"S	2010	nikon	0.92	0.85	0.74	0.84	
75	43° 34' 42.88652"W	19° 14' 00.60419"S	2009	nikon	0.47	0.94	1.14	0.85	
76	43° 34' 43.97102"W	19° 14' 00.32483"S	2008	nikon	1.01	1.08	0.99	1.03	
77	43° 34' 44.97416"W	19° 14' 00.23523"S	2003	nikon	1.01	1.23	0.94	1.06	
78	43° 34' 45.91770"W	19° 13' 59.28207"S	2004	nikon	0.79	0.81	0.88	0.83	
79	43° 34' 47.20342"W	19° 13' 59.02186"S	1996	nikon	1.01	1.89	1.02	1.31	
80	43° 34' 49.33542"W	19° 13' 59.75089"S	1992	nikon	2.06	2.04	2.06	2.05	clinometro/laser

81	43° 34' 48.76345"W	19° 13' 58.67177"S	1993	nikon	0.00	0.00	0.00	0.00	ravina
82	43° 34' 47.47231"W	19° 13' 58.12929"S	1997	nikon	0.81	0.46	0.83	0.70	ALVO - Arvore rio
83	43° 34' 47.59640"W	19° 13' 56.36437"S	1999	nikon	0.75	0.90	0.86	0.84	
84	43° 34' 46.48478"W	19° 13' 55.54021"S	2005	nikon	0.00	0.00	0.00	0.00	Estrada

Área 3 – Quadrante 16

Nome	Long	Lat	nº da foto	camera	Altura da vegetação			Altura média da vegetação	observação
1	43° 35' 24.19352"W	19° 17' 56.02038"S	2124	Nikon	0.69	0.62	1.05	0.79	
2	43° 35' 24.73574"W	19° 17' 56.15419"S	2125	Nikon	0.16	0.51	0.28	0.32	
3	43° 35' 25.55860"W	19° 17' 56.31294"S	2126	Nikon	0.21	0.24	0.40	0.28	
4	43° 35' 26.75566"W	19° 17' 56.46686"S	2127	Nikon	2.18	1.11	0.74	1.34	
5	43° 35' 27.86798"W	19° 17' 56.75179"S	2128	Nikon	1.39	1.04	1.18	1.20	
6	43° 35' 29.03579"W	19° 17' 57.37424"S	2129	Nikon	0.45	0.42	0.49	0.45	
7	43° 35' 29.74260"W	19° 17' 57.79748"S	2130	Nikon	0.63	0.43	0.41	0.49	
8	43° 35' 30.42036"W	19° 17' 57.94644"S	2131	Nikon	2.20			2.20	
9	43° 35' 31.54196"W	19° 17' 58.05458"S	2132	Nikon	0.54	0.42	0.66	0.54	
10	43° 35' 32.81316"W	19° 17' 58.21576"S	2133	Nikon	0.89	0.69	0.82	0.80	
11	43° 35' 32.82671"W	19° 17' 56.72855"S	2134	Nikon	0.47	0.29	0.28	0.35	
12	43° 35' 31.66191"W	19° 17' 56.60071"S	2135	Nikon	0.76	0.48	0.48	0.57	
13	43° 35' 30.63781"W	19° 17' 56.43160"S	2136	Nikon	0.64	0.96	1.08	0.89	
14	43° 35' 29.70019"W	19° 17' 56.23057"S	2137	Nikon	0.53	0.41	0.79	0.58	
15	43° 35' 28.44747"W	19° 17' 55.88590"S	2138	Nikon	0.57	1.83	1.93	1.44	
16	43° 35' 26.75537"W	19° 17' 55.24191"S	2139	Nikon	0.53	0.49	0.55	0.52	
17	43° 35' 25.81167"W	19° 17' 55.24992"S	2140	Nikon	0.44	0.36	0.38	0.39	
18	43° 35' 25.08777"W	19° 17' 55.08087"S	2141	Nikon	0.56	0.57	0.61	0.58	
19	43° 35' 24.27968"W	19° 17' 54.97880"S	2142	Nikon	0.74	0.79	0.74	0.76	

20	43° 35' 23.65508"W	19° 17' 54.91655"S	2143	Nikon	1.04	1.11	0.51	0.89	
21	43° 35' 23.68897"W	19° 17' 54.19409"S	2144	Nikon	0.99	0.84	0.32	0.72	
22	43° 35' 24.44369"W	19° 17' 54.10358"S	2145	Nikon	0.36	0.48	0.51	0.45	
23	43° 35' 25.43849"W	19° 17' 54.00555"S	2146	Nikon	0.95	0.94	0.73	0.87	
24	43° 35' 26.37871"W	19° 17' 54.08772"S	2147	Nikon	0.38	0.44	0.32	0.38	
25	43° 35' 27.45762"W	19° 17' 54.32587"S	2148	Nikon	0.38	0.35	0.29	0.34	
26	43° 35' 28.72832"W	19° 17' 54.50315"S	2149	Nikon	0.26	0.37	0.46	0.36	
27	43° 35' 29.80456"W	19° 17' 54.51733"S	2150	Nikon	0.55	0.52	0.34	0.47	
28	43° 35' 30.54498"W	19° 17' 54.57316"S	2151	Nikon	0.62	0.78	0.48	0.63	
29	43° 35' 31.43971"W	19° 17' 54.36581"S	2152	Nikon	0.64	1.85	0.94	1.14	
30	43° 35' 32.67639"W	19° 17' 54.40985"S	2153	Nikon	1.11	0.42	0.64	0.72	
31	43° 35' 32.78649"W	19° 17' 53.01313"S	2154	Nikon	0.37	0.41	1.51	0.76	
32	43° 35' 31.58697"W	19° 17' 52.65885"S	2155	Nikon	1.72	1.54	1.40	1.55	
33	43° 35' 30.95722"W	19° 17' 52.59841"S	2156	Nikon	0.46	0.66	1.15	0.76	
34	43° 35' 30.01015"W	19° 17' 52.87844"S	2157	Nikon	0.75	1.72	1.62	1.36	
35	43° 35' 28.58221"W	19° 17' 52.76336"S	2158	Nikon	0.35	0.36	0.58	0.43	
36	43° 35' 27.37656"W	19° 17' 52.75051"S	2159	Nikon	1.09	0.67	0.90	0.89	
37	43° 35' 26.34321"W	19° 17' 52.46346"S	2160	Nikon	0.70	0.58	0.56	0.61	
38	43° 35' 25.05910"W	19° 17' 52.40416"S	2161	Nikon	0.61	0.41	0.52	0.51	
39	43° 35' 24.06635"W	19° 17' 52.18177"S	2162	Nikon	0.94	0.65	0.72	0.77	
40	43° 35' 23.46784"W	19° 17' 51.82109"S	2163	Nikon	0.77	0.81	0.69	0.76	
41	43° 35' 23.37351"W	19° 17' 49.63549"S	2164	Nikon	1.44	1.15	1.22	1.27	
42	43° 35' 24.82205"W	19° 17' 49.62223"S	2165	Nikon	0.72	0.61	0.49	0.61	
43	43° 35' 26.52475"W	19° 17' 49.76107"S	2166	Nikon	0.66	0.65	0.41	0.57	
44	43° 35' 27.76456"W	19° 17' 49.75074"S	2167	Nikon	0.65	0.77	0.62	0.68	
45	43° 35' 28.98413"W	19° 17' 49.72413"S	2168	Nikon	1.35	0.97	1.76	1.36	
46	43° 35' 29.96694"W	19° 17' 49.83520"S	2169	Nikon	0.66	0.68	0.67	0.67	
47	43° 35' 31.21688"W	19° 17' 49.76297"S	2170	Nikon	0.74	0.50	0.69	0.64	

48	43° 35' 32.42593"W	19° 17' 49.69048"S	2171	Nikon	0.62	0.78	0.56	0.65	
49	43° 35' 33.30283"W	19° 17' 49.44680"S	2172	Nikon	0.42	0.35	0.45	0.41	
50	43° 35' 34.28006"W	19° 17' 48.92921"S	2173	Nikon	0.59	0.51	0.88	0.66	
51	43° 35' 33.93177"W	19° 17' 50.13740"S	2174	Nikon	1.29	1.43	0.92	1.21	
52	43° 35' 33.59087"W	19° 17' 51.00579"S	2175	Nikon	1.02	2.20	1.09	1.44	
53	43° 35' 34.42776"W	19° 17' 48.42034"S	2176	Nikon	0.38	0.28	0.47	0.38	
54	43° 35' 34.20168"W	19° 17' 47.85122"S	2177	Nikon	1.84	0.83	1.85	1.51	
55	43° 35' 32.82723"W	19° 17' 47.96797"S	2178	Nikon	0.72	0.58	0.57	0.62	
56	43° 35' 31.51343"W	19° 17' 47.54446"S	2179	Nikon	0.42	0.40	0.36	0.39	
57	43° 35' 30.37618"W	19° 17' 47.48417"S	2180	Nikon	0.45	0.52	0.52	0.50	
58	43° 35' 28.80948"W	19° 17' 47.83845"S	2181	Nikon	0.48	0.42	0.39	0.43	
59	43° 35' 27.57890"W	19° 17' 48.01034"S	2182	Nikon	0.50	0.55	0.43	0.49	
60	43° 35' 26.19872"W	19° 17' 47.30145"S	2183	Nikon	0.32	0.44	0.68	0.48	
61	43° 35' 24.76141"W	19° 17' 46.84964"S	2184	Nikon	0.57	0.73	0.74	0.68	
62	43° 35' 24.66663"W	19° 17' 45.05477"S	2185	Nikon	0.44	0.45	0.45	0.45	
63	43° 35' 26.45828"W	19° 17' 44.58021"S	2186	Nikon	0.92	0.74	0.64	0.77	
64	43° 35' 28.03338"W	19° 17' 44.65988"S	2187	Nikon	0.55	0.58	0.64	0.59	
65	43° 35' 28.93262"W	19° 17' 44.77479"S	2188	Nikon	0.59	0.53	0.39	0.50	
66	43° 35' 30.53595"W	19° 17' 45.19095"S	2189	Nikon	0.69	0.51	0.55	0.58	
67	43° 35' 32.22383"W	19° 17' 45.08105"S	2190	Nikon	0.67	0.49	0.81	0.66	
68	43° 35' 32.67176"W	19° 17' 45.33757"S	2191	Nikon	0.66	0.53	0.47	0.55	
69	43° 35' 33.78897"W	19° 17' 45.56099"S	2192	Nikon	0.37	0.29	0.29	0.32	
70	43° 35' 35.00850"W	19° 17' 44.70812"S	2193	Nikon	0.34	0.39	0.42	0.38	
71	43° 35' 35.68060"W	19° 17' 43.28599"S	2194	Nikon	1.44	1.28	1.23	1.32	
72	43° 35' 34.95596"W	19° 17' 43.35555"S	2195	Nikon	0.69	1.10	1.30	1.03	
73	43° 35' 34.40796"W	19° 17' 43.83257"S	2196	Nikon	0.99	0.72	1.39	1.03	
74	43° 35' 33.81734"W	19° 17' 43.82321"S	2197	Nikon	0.36	0.55	0.77	0.56	
75	43° 35' 33.83393"W	19° 17' 44.08975"S	2198	Nikon	0.00	0.00	0.00	0.00	Afloramento - Rocha exposta

76	43° 35' 32.59405"W	19° 17' 43.72378"S	2199	Nikon	0.41	0.53	0.57	0.50	
77	43° 35' 30.60388"W	19° 17' 43.69264"S	2200	Nikon	0.64	0.49	0.42	0.52	
78	43° 35' 29.08812"W	19° 17' 44.09904"S	2201	Nikon	1.69	1.13	1.28	1.37	
79	43° 35' 27.37011"W	19° 17' 43.00546"S	2202	Nikon	0.39	0.53	0.51	0.48	
80	43° 35' 25.85372"W	19° 17' 42.35739"S	2203	Nikon	0.48	0.56	0.72	0.59	
81	43° 35' 26.35823"W	19° 17' 41.06137"S	2204	Nikon	0.40	0.80	0.60	0.60	
82	43° 35' 27.47624"W	19° 17' 41.19265"S	2205	Nikon	0.91	1.68	0.82	1.14	
83	43° 35' 28.02592"W	19° 17' 40.37913"S	2206	Nikon	1.35	1.57	1.07	1.33	
84	43° 35' 27.96369"W	19° 17' 39.58821"S	2207	Nikon	1.76	1.34	0.82	1.31	
85	43° 35' 27.07468"W	19° 17' 40.49893"S	2208	Nikon	1.61	0.92	1.42	1.32	
86	43° 35' 28.37949"W	19° 17' 41.75458"S	2209	Nikon	0.34	0.54	0.79	0.56	
87	43° 35' 29.64771"W	19° 17' 42.19164"S	2210	Nikon	0.55	0.52	0.47	0.51	
88	43° 35' 30.16489"W	19° 17' 40.90217"S	2211	Nikon	0.92	0.49	0.88	0.76	
89	43° 35' 30.25354"W	19° 17' 39.30148"S	2212	Nikon	0.58	2.20	0.77	1.18	
90	43° 35' 31.24667"W	19° 17' 39.83398"S	2213	Nikon	0.65	0.51	0.44	0.53	
91	43° 35' 30.38776"W	19° 17' 41.86004"S	2214	Nikon	0.52	0.50	0.63	0.55	
92	43° 35' 31.31826"W	19° 17' 42.69595"S	2215	Nikon	0.71	0.48	0.65	0.61	
93	43° 35' 33.39277"W	19° 17' 42.80964"S	2216	Nikon	0.48	0.53	0.44	0.48	
94	43° 35' 34.63672"W	19° 17' 42.48563"S	2217	Nikon	1.51	0.89	1.11	1.17	
95	43° 35' 34.23895"W	19° 17' 41.55331"S	2218	Nikon	1.32	1.43	1.13	1.29	
96	43° 35' 33.42291"W	19° 17' 41.88886"S	2219	Nikon	0.47	1.56	0.86	0.96	
97	43° 35' 32.45592"W	19° 17' 42.20350"S	2220	Nikon	0.57	0.50	0.79	0.62	
98	43° 35' 31.78033"W	19° 17' 41.33941"S	2221	Nikon	0.34	0.45	0.60	0.46	
99	43° 35' 32.35678"W	19° 17' 40.32417"S	2222	Nikon	0.36	0.51	0.41	0.43	
100	43° 35' 29.06007"W	19° 17' 40.38452"S	2223	Nikon	0.45	0.38	0.35	0.39	

ANEXO 2 – Relatórios do PIX4D dos processamentos e gerações das nuvens de pontos

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro - Non-Commercial version 2.0.100



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	vellozia_210616
Processed	2016-07-06 13:28:13
Average Ground Sampling Distance (GSD)	5.24 cm / 2.06 in
Area Covered	0.8514 km ² / 85.1436 ha / 0.3289 sq. mi. / 210.503 acres

Quality Check



Images	median of 52464 keypoints per image	
Dataset	433 out of 439 images calibrated (98%), all images enabled	
Camera Optimization	3.3% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 31446 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 3 GCPs (3 3D), mean RMS error = 0.169 m	

Preview

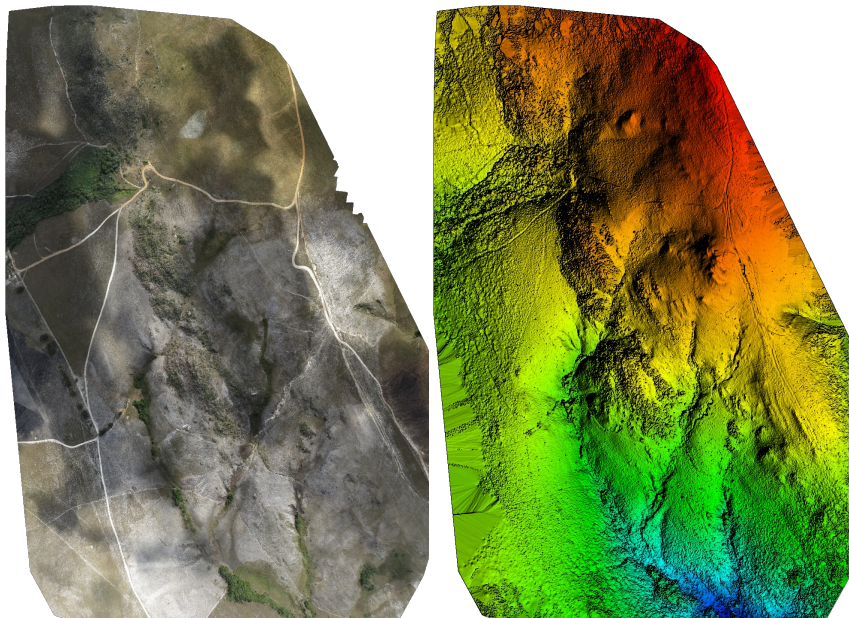


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	433 out of 439
Number of Geolocated Images	439 out of 439

? Initial Image Positions

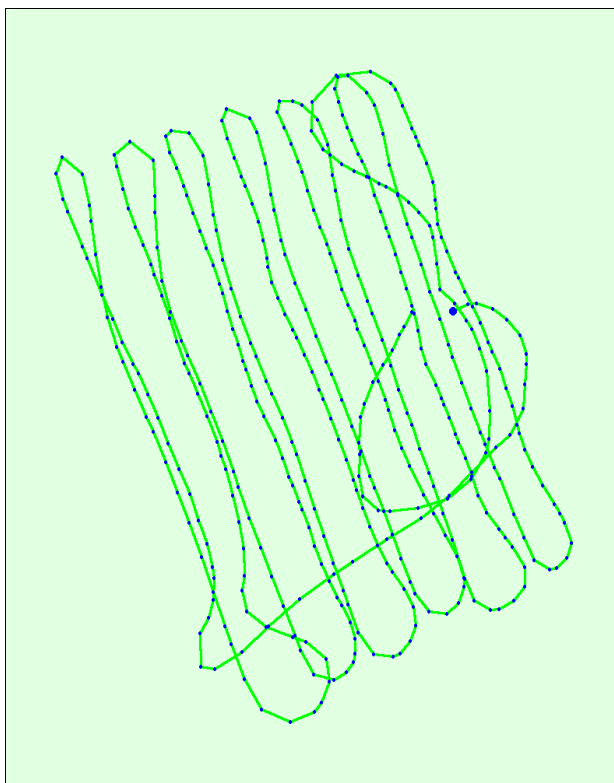


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



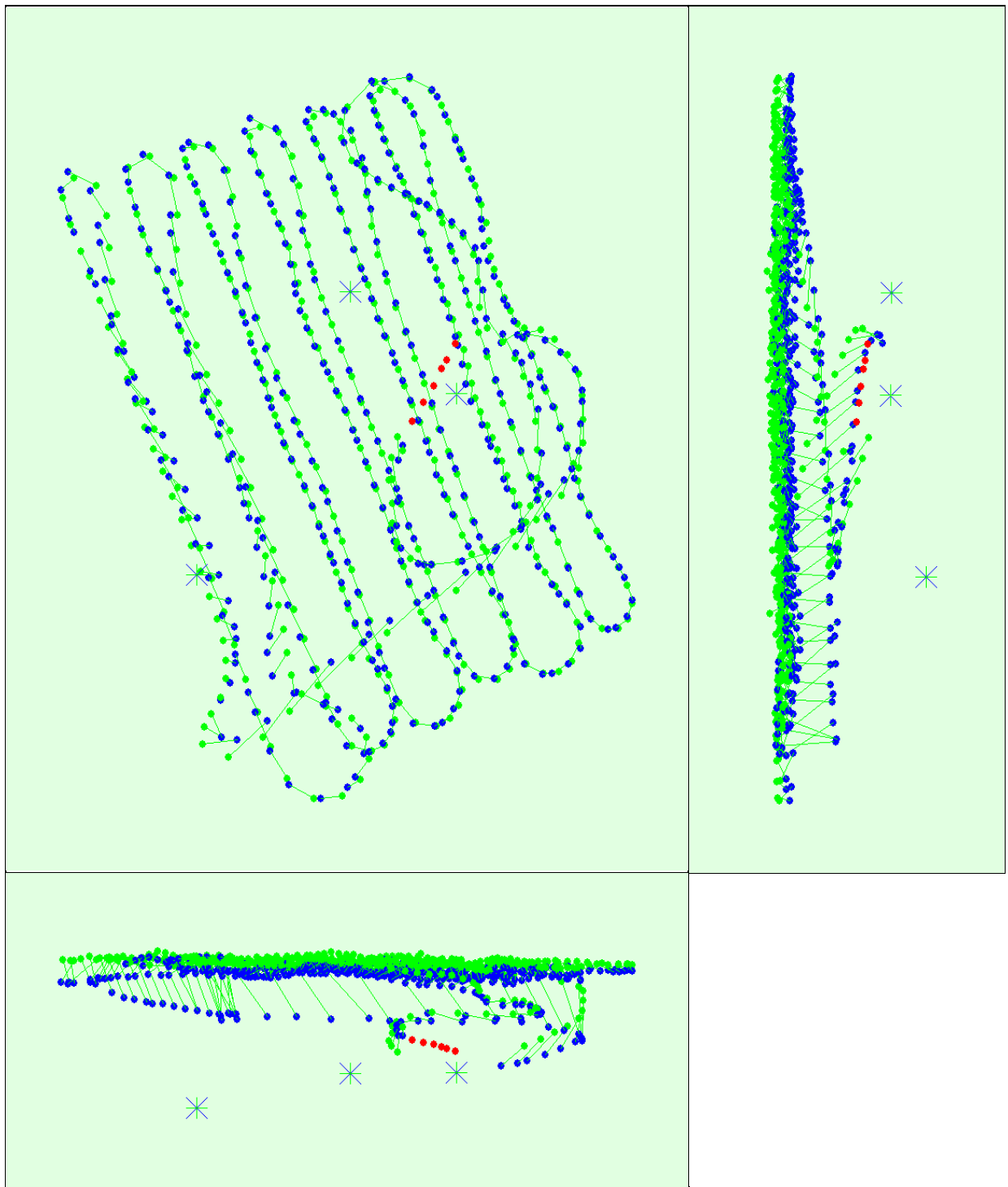


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images.

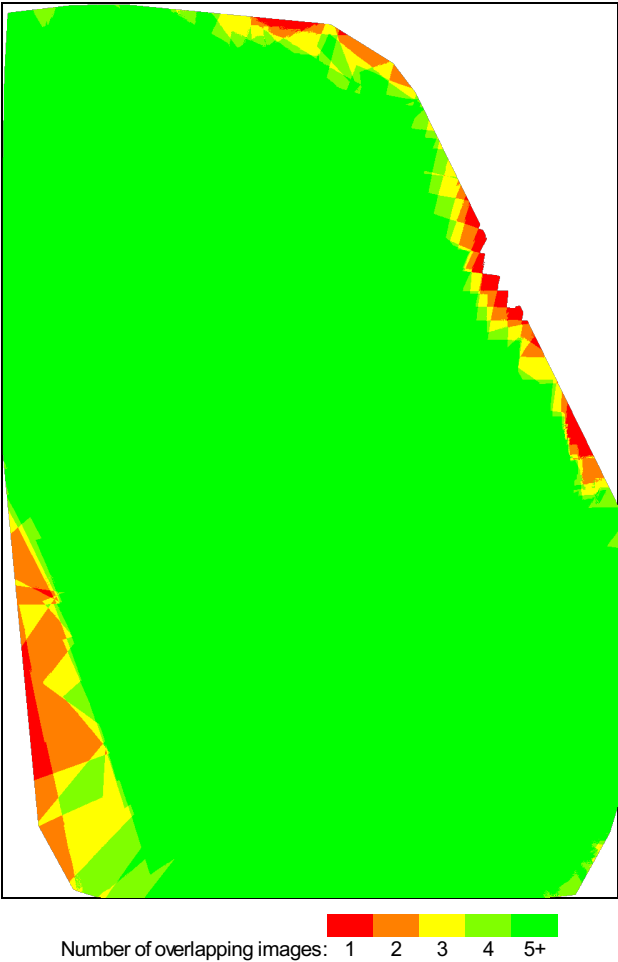


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	13153448
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3070537
Mean Reprojection Error [pixels]	0.253817

Internal Camera Parameters

CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.198 [mm] x 4.648 [mm]

EXIF ID: CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2904.350 [pixel] 4.500 [mm]	2000.000 [pixel] 3.099 [mm]	1500.000 [pixel] 2.324 [mm]	-0.013	0.005	-0.002	0.006	-0.003
Optimized Values	3000.420 [pixel] 4.649 [mm]	1979.613 [pixel] 3.067 [mm]	1539.015 [pixel] 2.385 [mm]	-0.015	-0.007	0.011	0.004	-0.002

The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	52464	31446
Min	20034	46
Max	79332	56797
Mean	51180	30377

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1527347
In 3 Images	503795
In 4 Images	270526
In 5 Images	170268
In 6 Images	118324
In 7 Images	87180
In 8 Images	66161
In 9 Images	51476
In 10 Images	41589
In 11 Images	33976
In 12 Images	28110
In 13 Images	23618
In 14 Images	20399
In 15 Images	17484
In 16 Images	15400
In 17 Images	13361
In 18 Images	11833
In 19 Images	10289
In 20 Images	8968
In 21 Images	7712
In 22 Images	6664
In 23 Images	5767
In 24 Images	5088
In 25 Images	4268
In 26 Images	3643
In 27 Images	3169
In 28 Images	2595
In 29 Images	2154
In 30 Images	1817
In 31 Images	1573
In 32 Images	1236
In 33 Images	1056
In 34 Images	876
In 35 Images	721
In 36 Images	588
In 37 Images	430
In 38 Images	329
In 39 Images	267
In 40 Images	202
In 41 Images	105
In 42 Images	81
In 43 Images	45
In 44 Images	22
In 45 Images	14
In 46 Images	4
In 47 Images	4
In 48 Images	3

? 2D Keypoint Matches

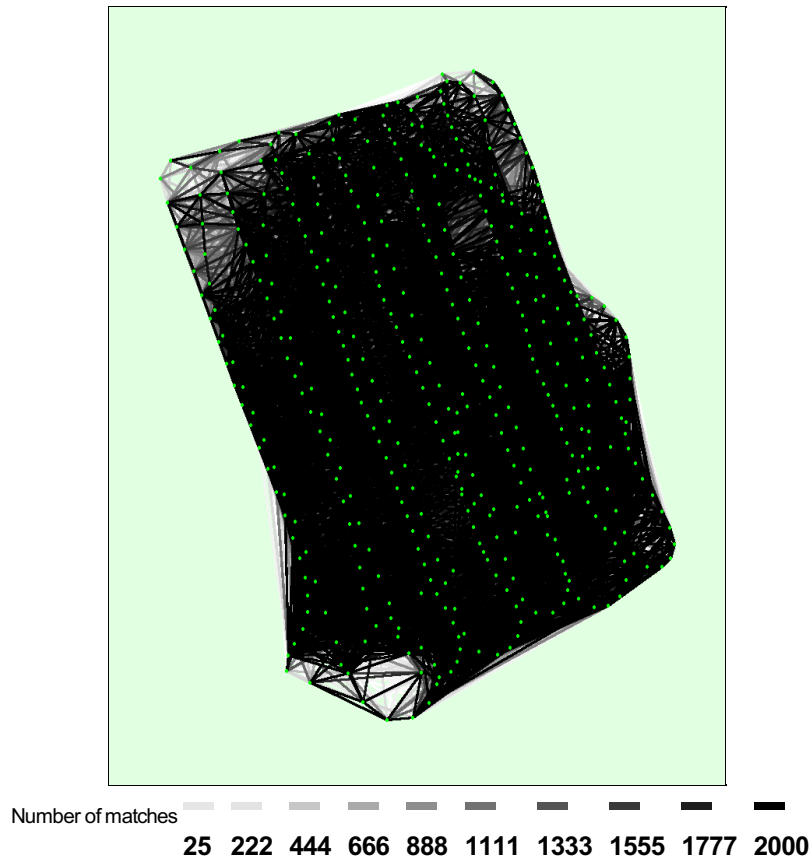


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Geolocation Details



? Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
Morro_vellozia (3D)	0.020/ 0.020	0.205	0.314	0.081	1.426	23 / 23
Decolagem (3D)	0.020/ 0.020	-0.273	-0.165	-0.081	1.223	26 / 26
Pastinho (3D)	0.020/ 0.020	0.170	-0.161	0.020	1.117	15 / 15
Mean [m]		0.034011	-0.004215	0.006844		
Sigma [m]		0.217200	0.224780	0.066865		
RMS Error [m]		0.219847	0.224819	0.067215		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified v.s. manually marked.

? Absolute Geolocation Variance



0 out of 433 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	18.01	47.34	9.47
-15.00	-12.00	7.85	4.85	0.92
-12.00	-9.00	9.70	2.31	1.39
-9.00	-6.00	5.77	1.39	1.62
-6.00	-3.00	2.08	0.46	3.93
-3.00	0.00	2.31	1.15	14.55
0.00	3.00	5.77	1.39	16.40

3.00	6.00	11.78	1.39	16.40
6.00	9.00	15.24	0.92	16.17
9.00	12.00	6.93	1.39	8.08
12.00	15.00	3.00	0.46	4.39
15.00	-	11.55	36.95	6.70
Mean [m]		-1.632521	5.084727	-14.887062
Sigma [m]		15.888436	27.488620	15.694970
RMS Error [m]		15.972086	27.954941	21.632307

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-1.632521	5.084727	-14.887062

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

? Relative Geolocation Variance



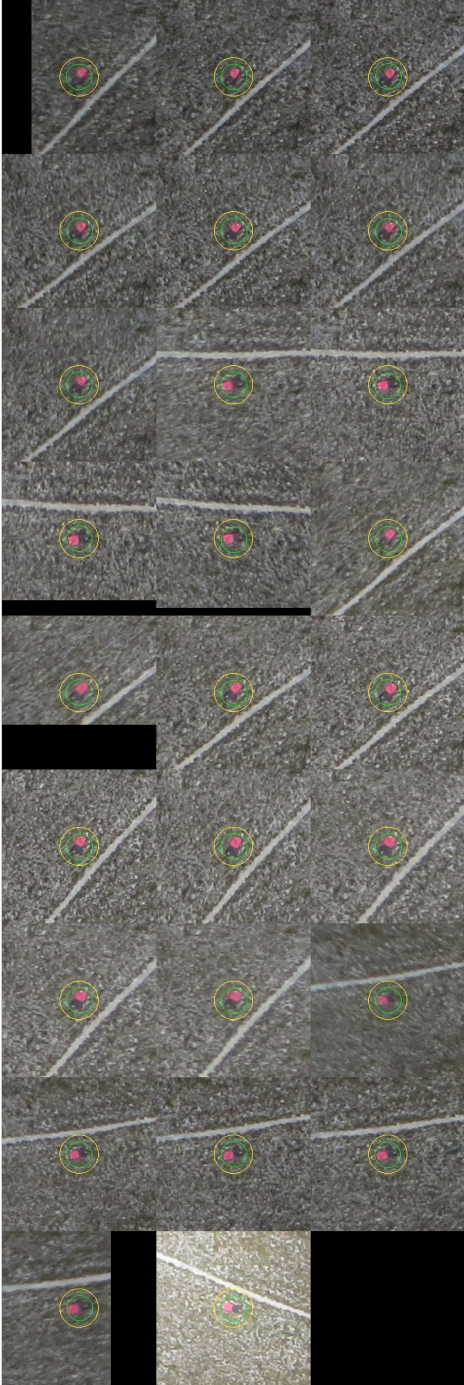
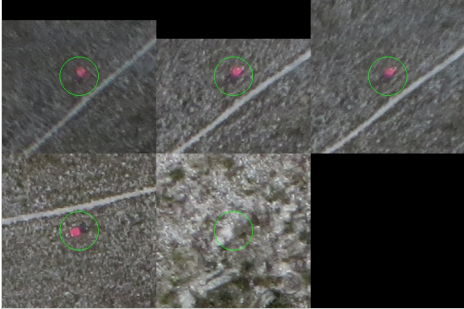
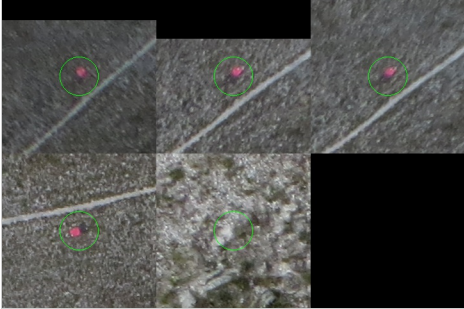
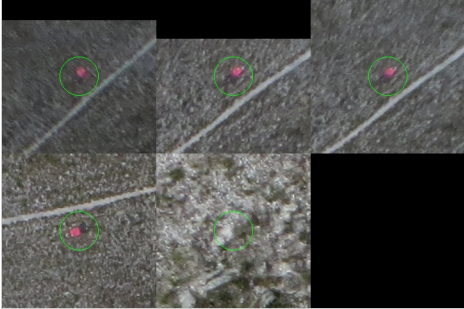
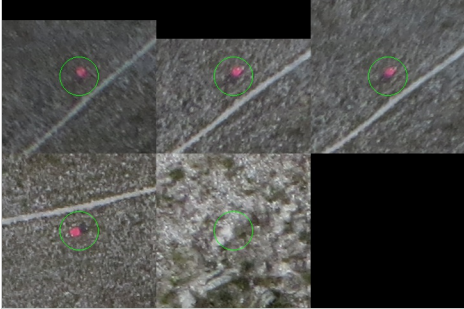
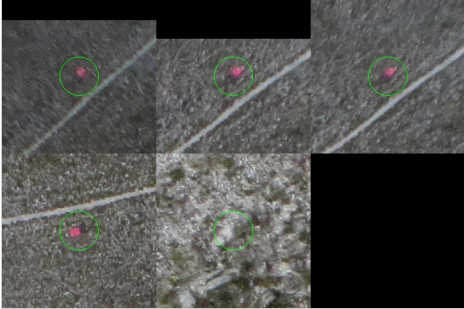
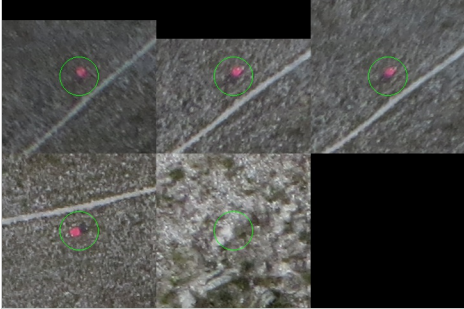
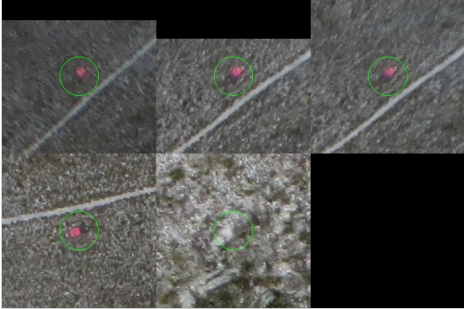
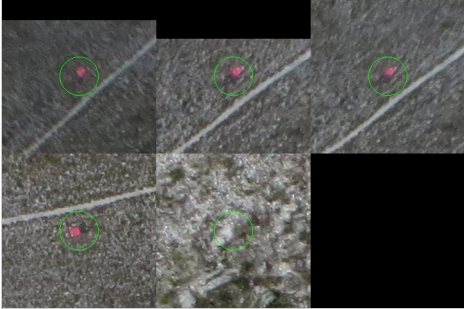
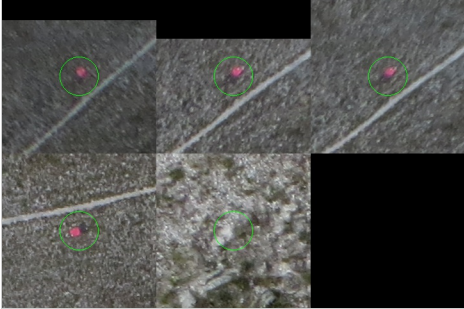
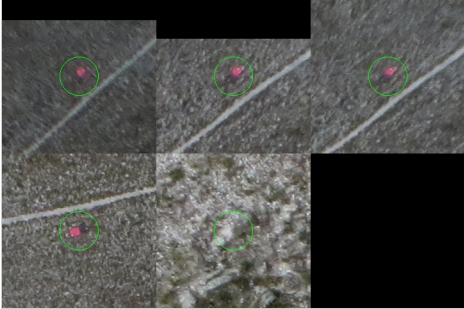
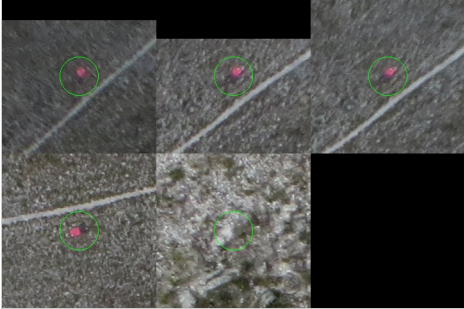
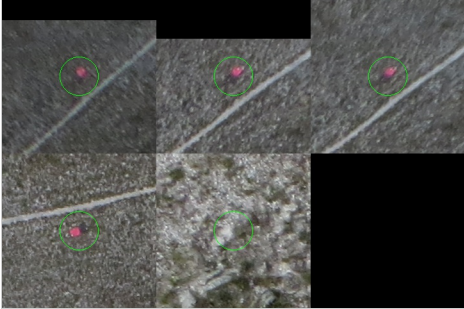
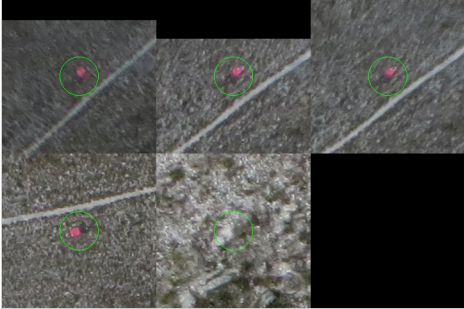
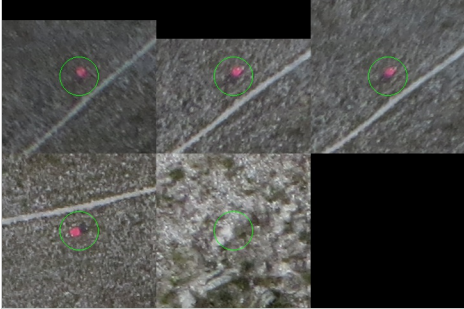
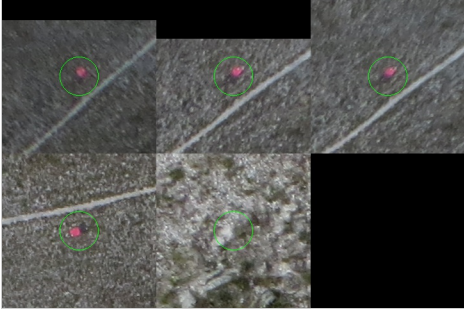
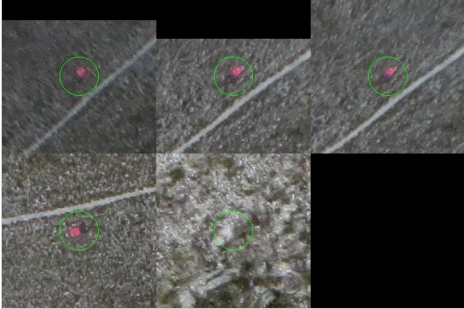
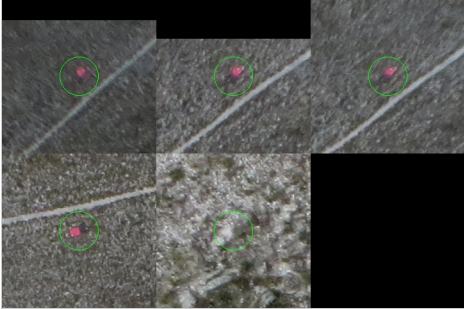
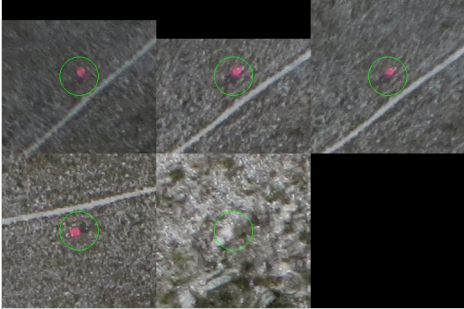
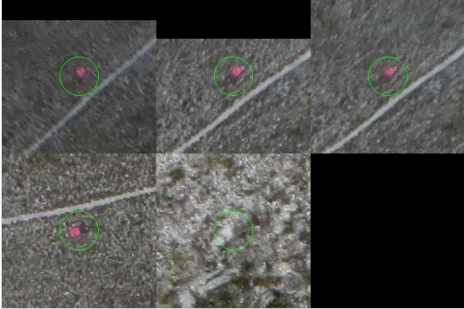
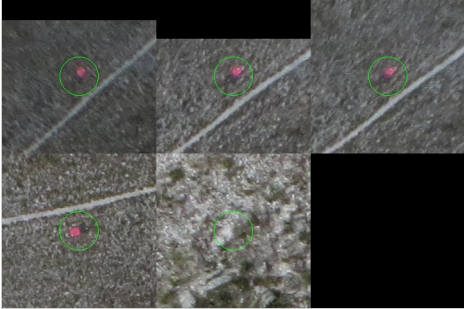
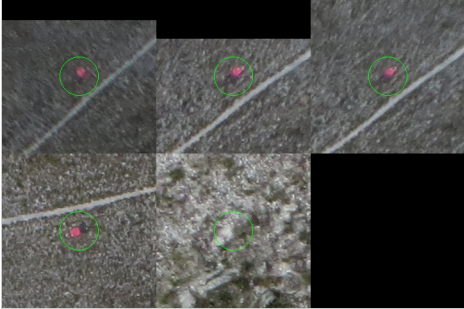
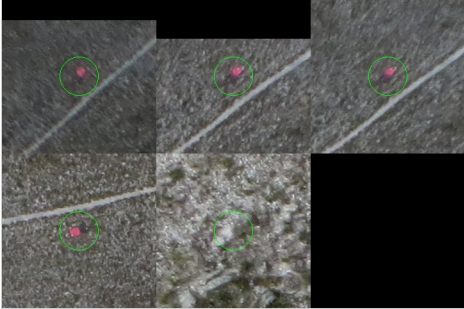
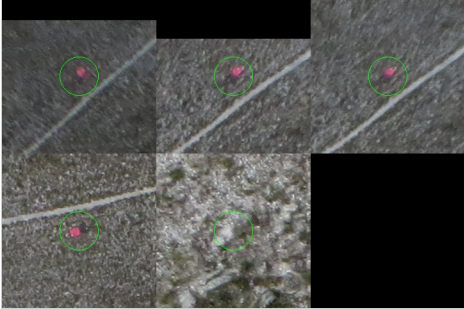
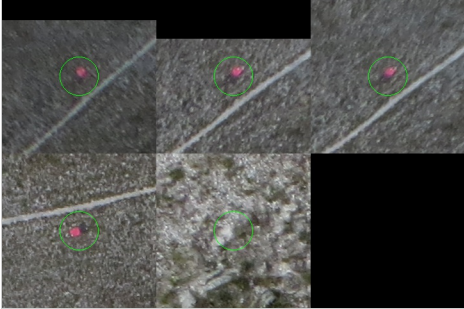
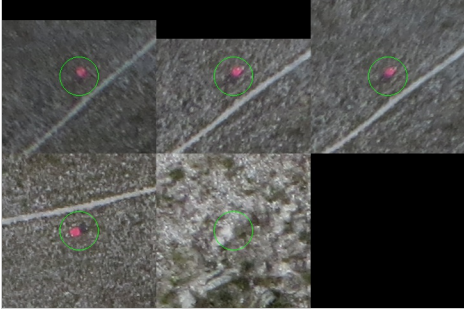
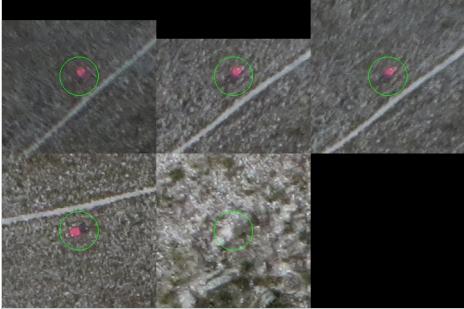
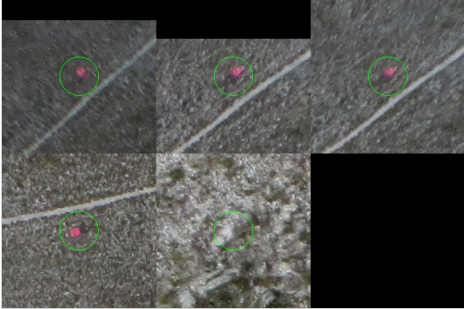
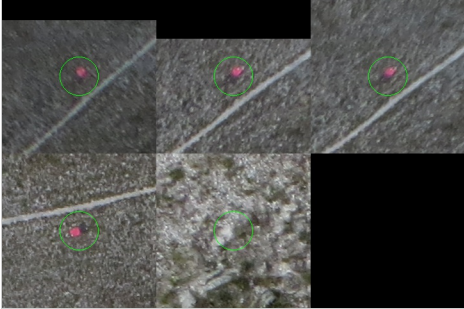
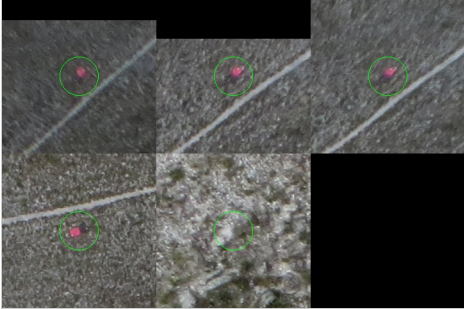
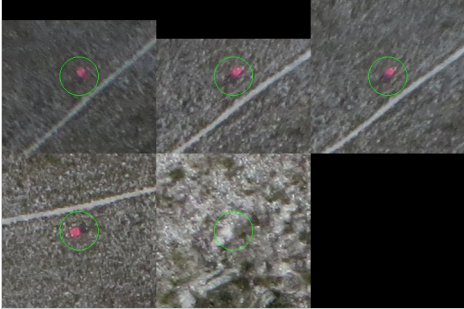
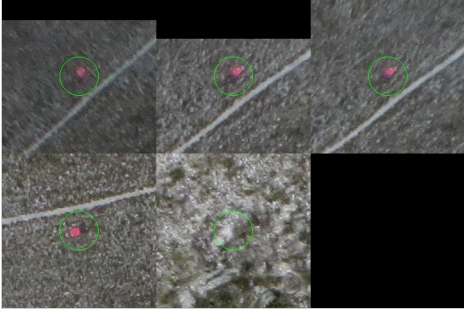
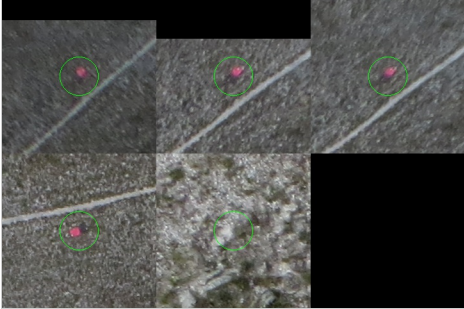
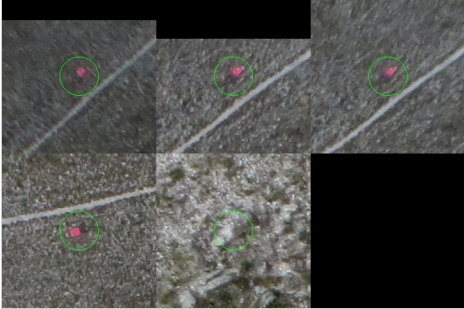
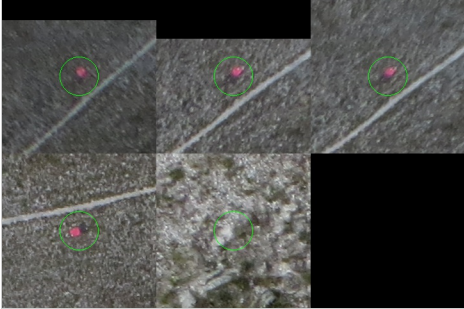
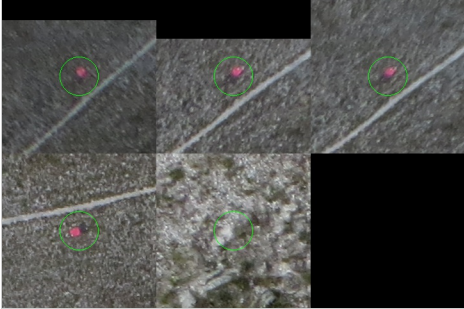
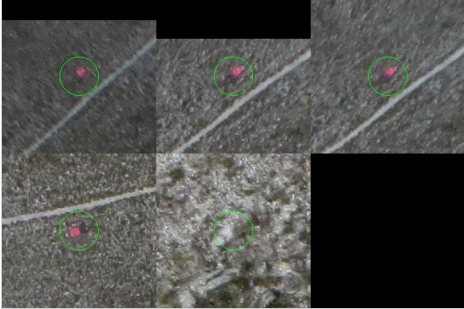
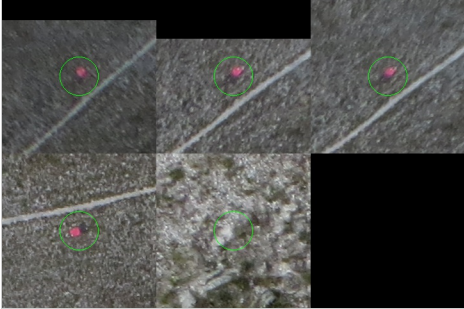
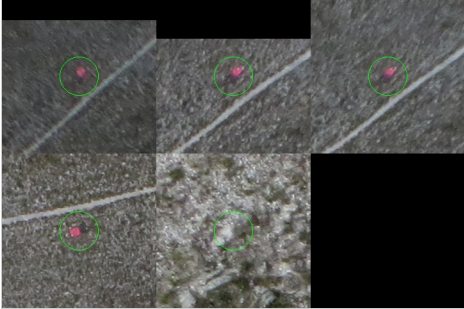
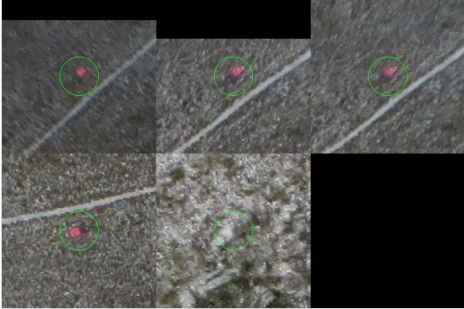
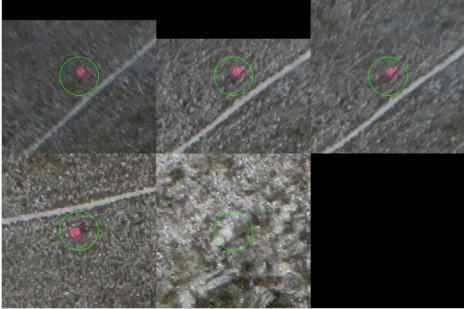
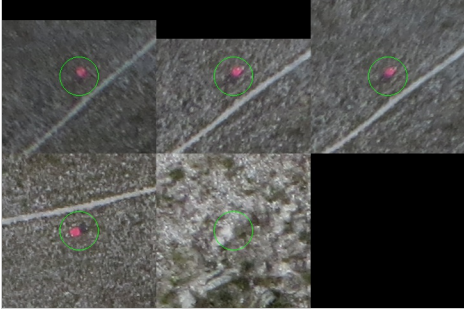
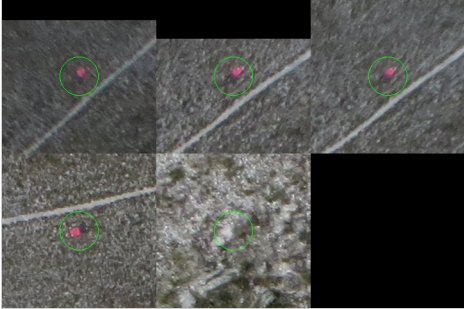
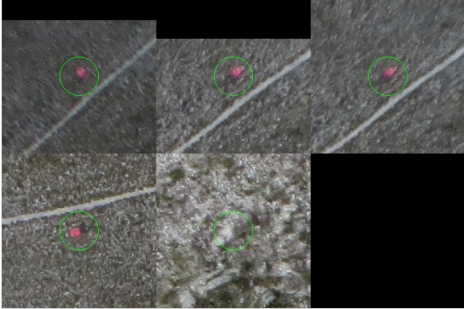
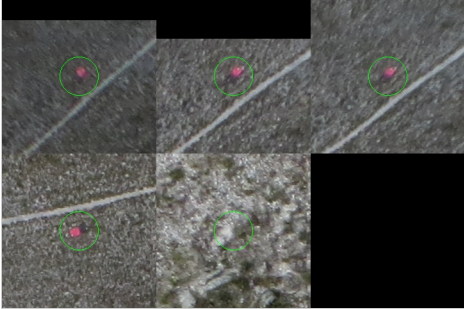
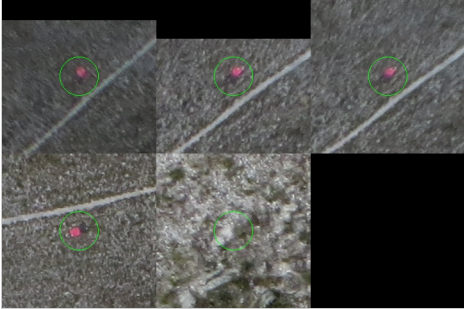
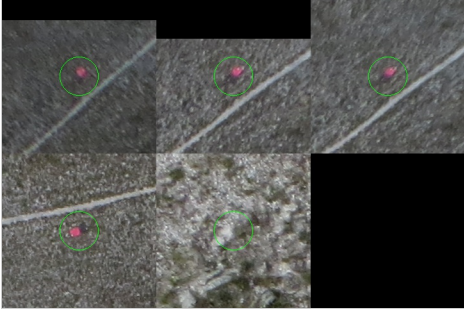
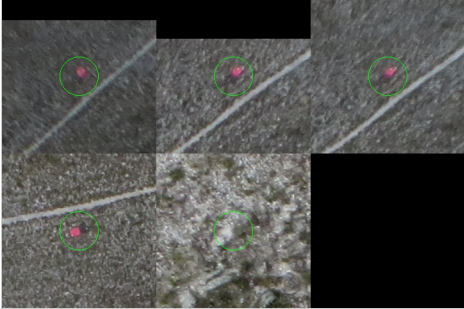
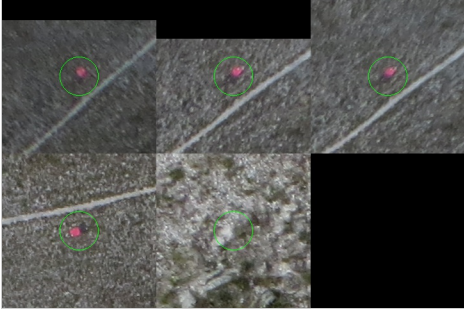
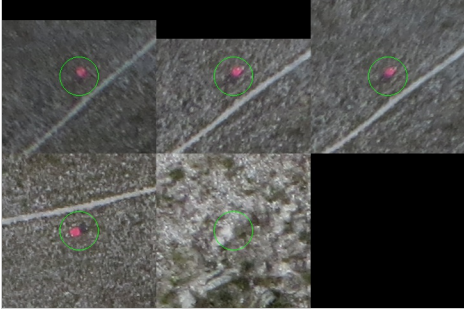
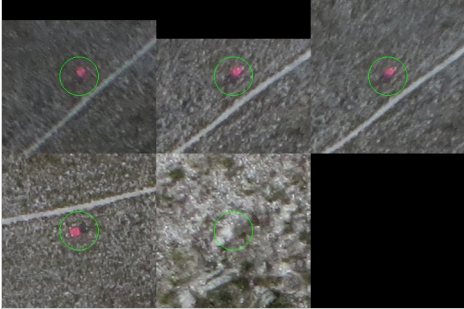
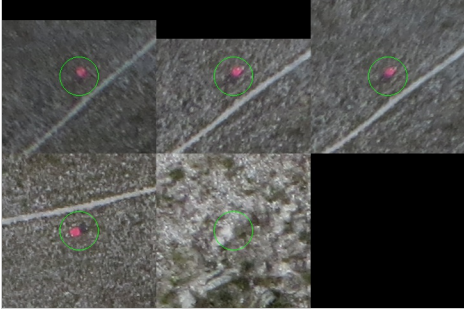
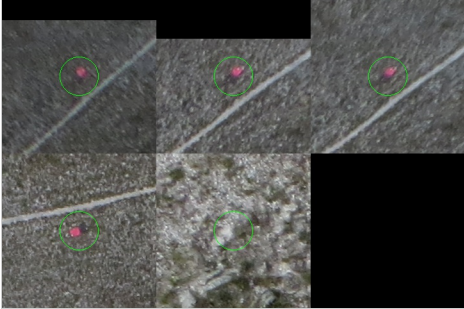
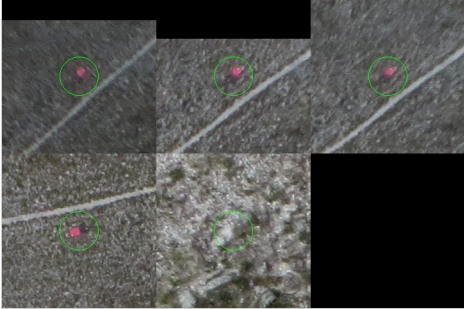
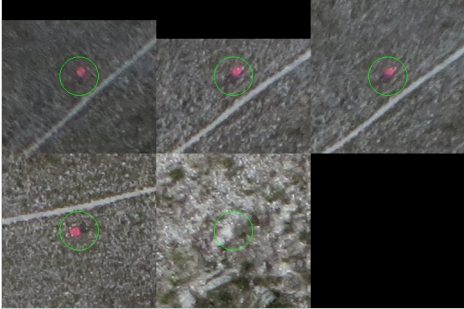
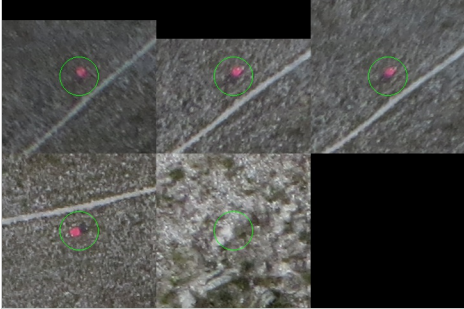
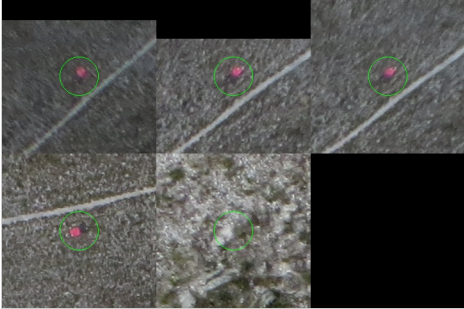
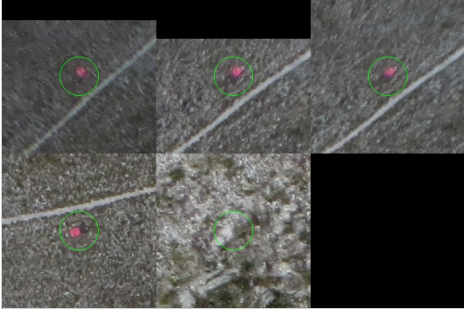
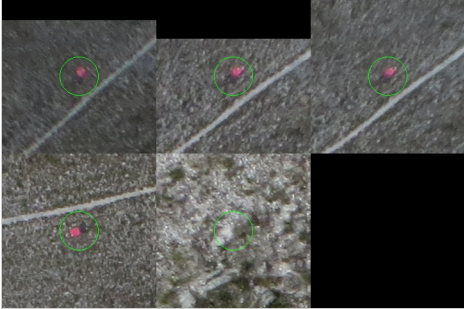
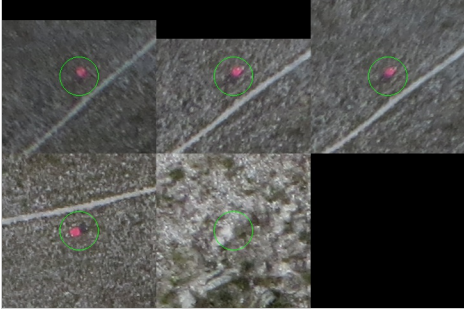
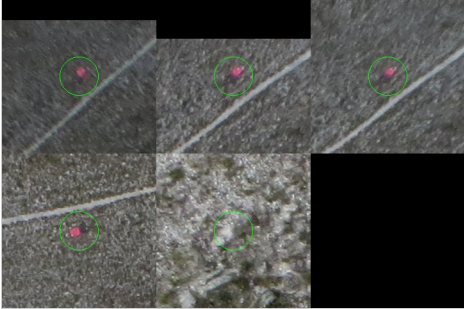
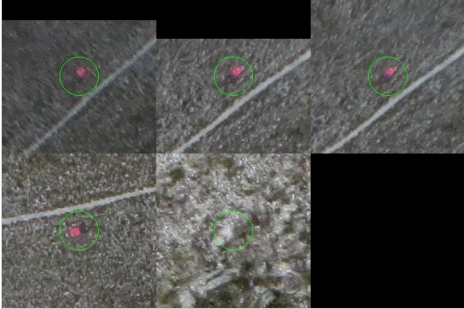
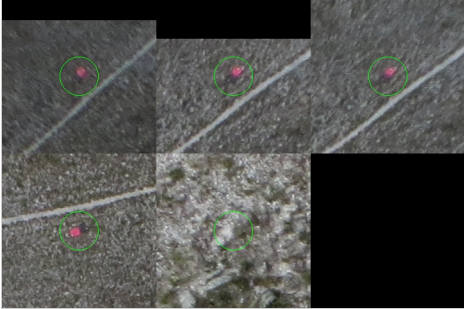
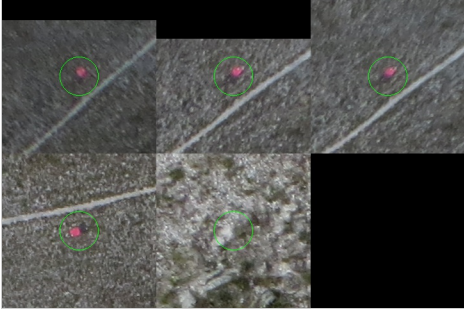
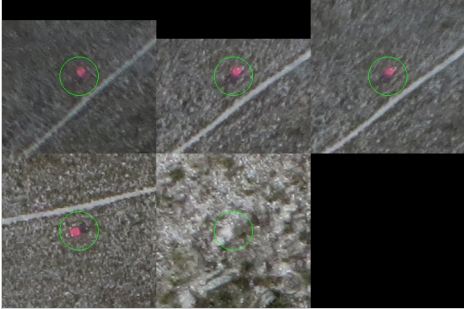
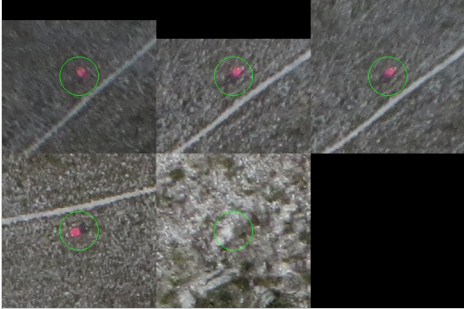
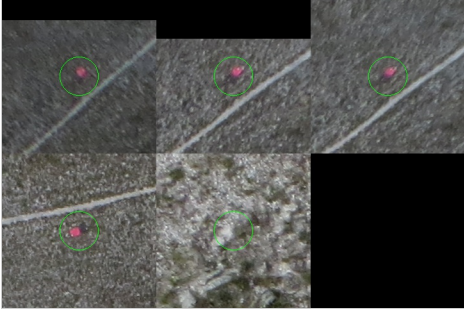
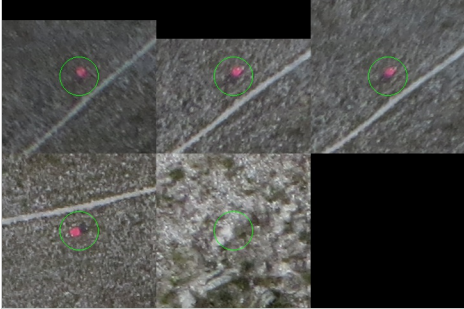
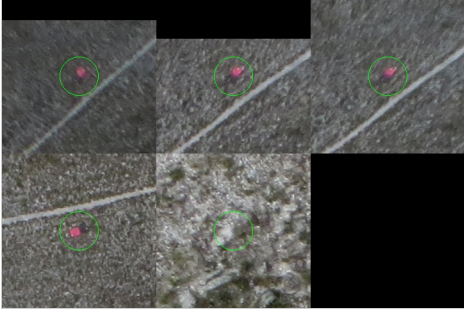
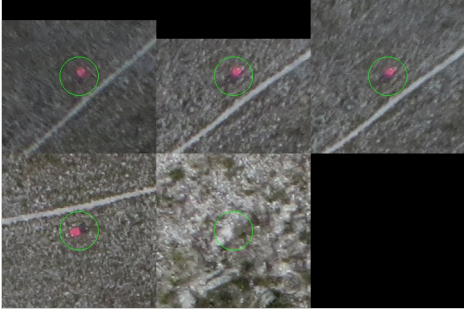
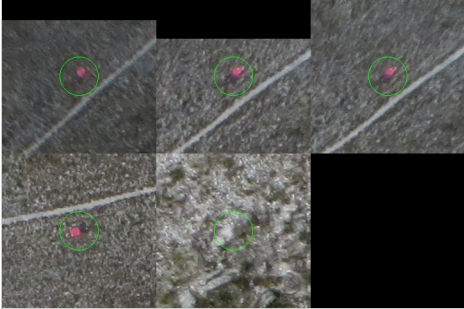
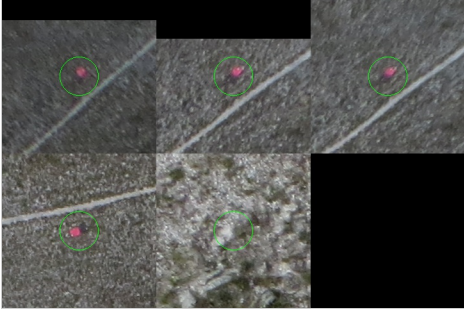
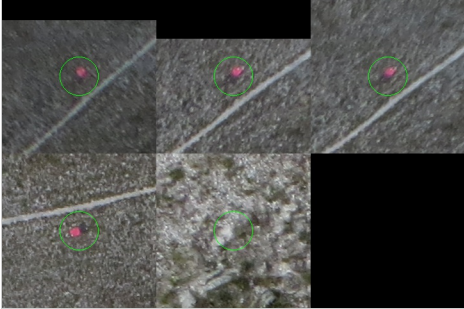
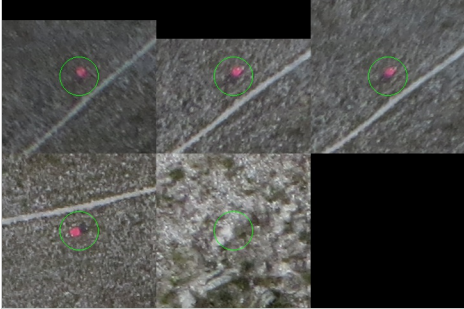
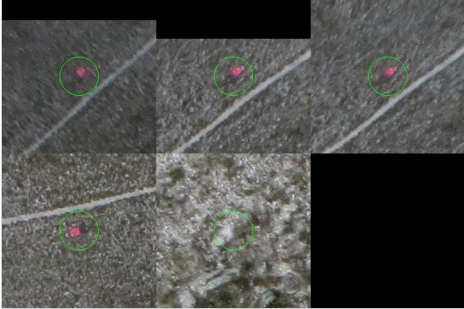
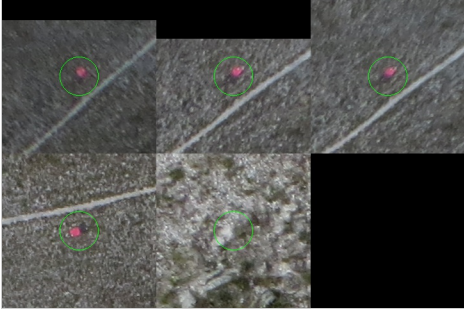
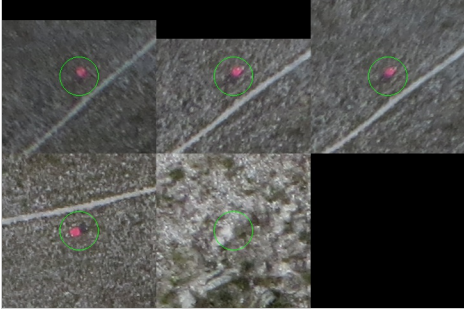
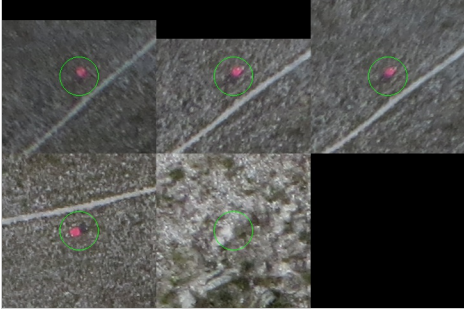
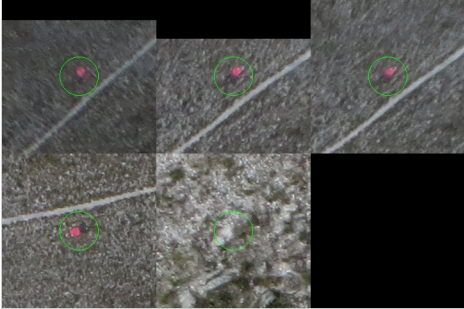
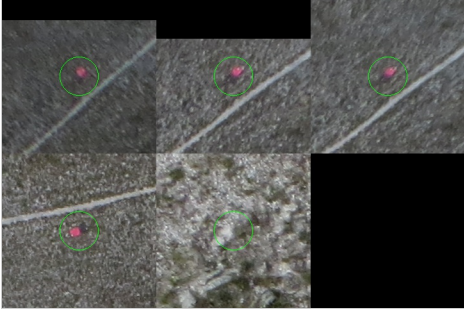
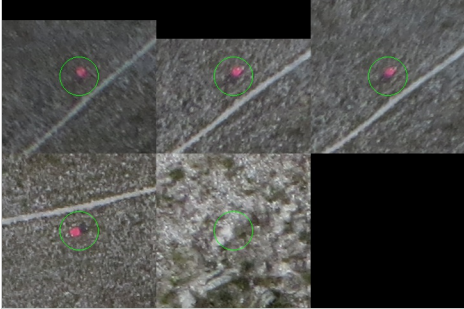
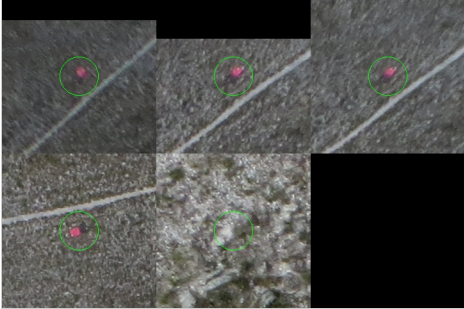
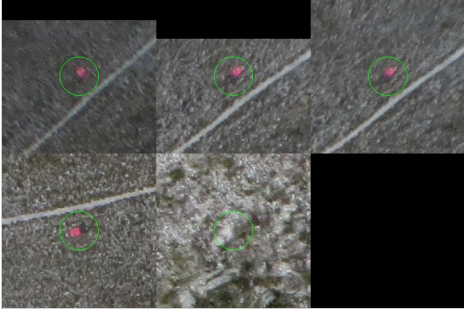
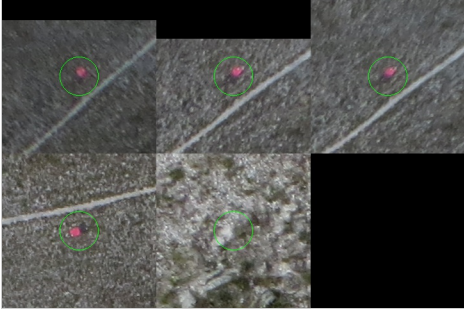
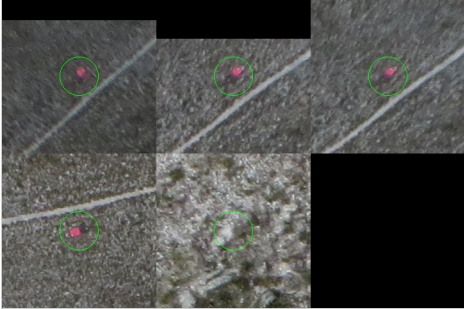
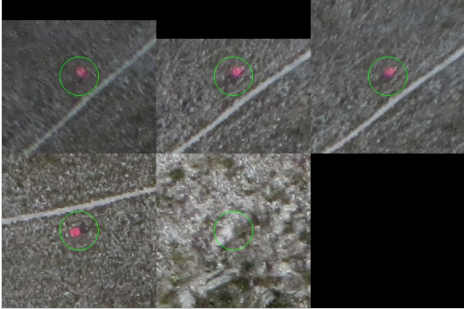
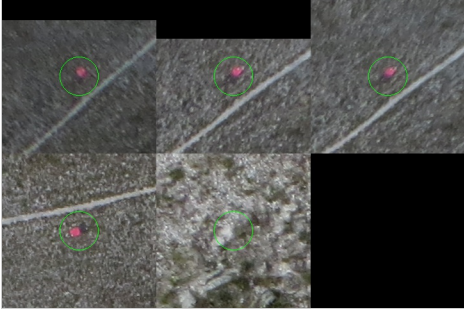
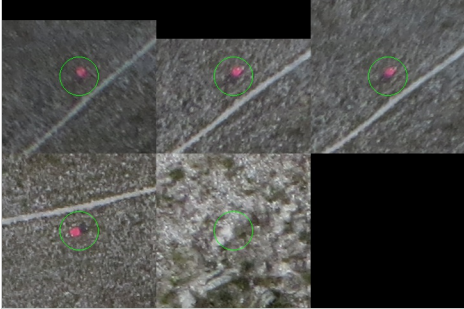
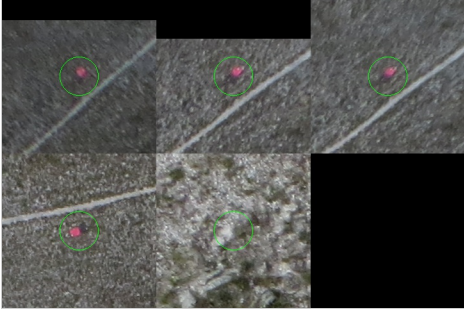
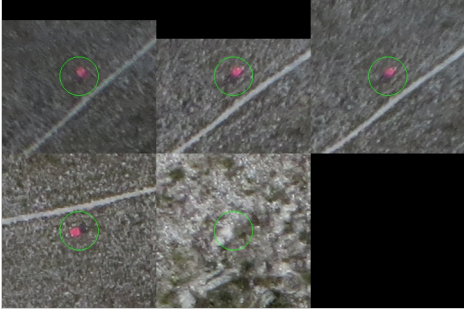
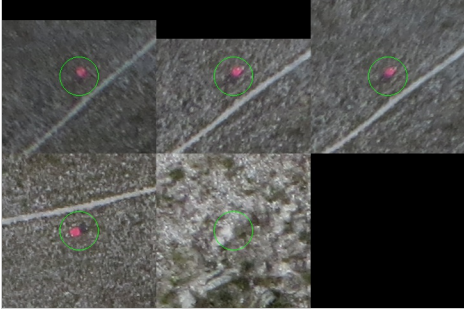
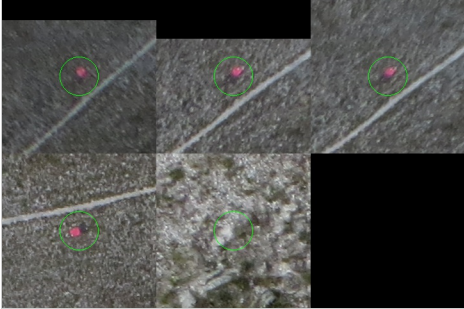
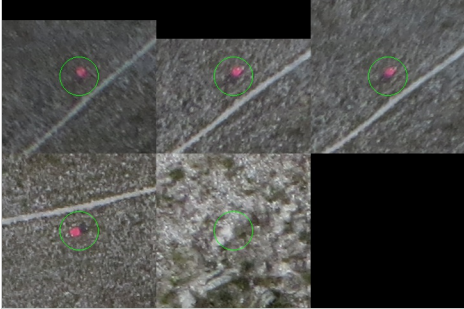
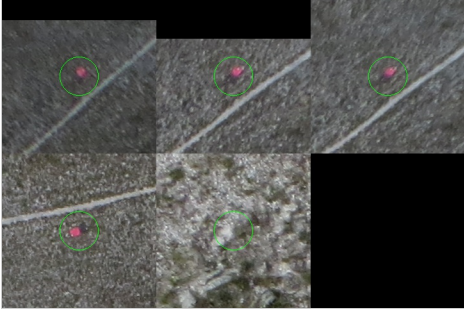
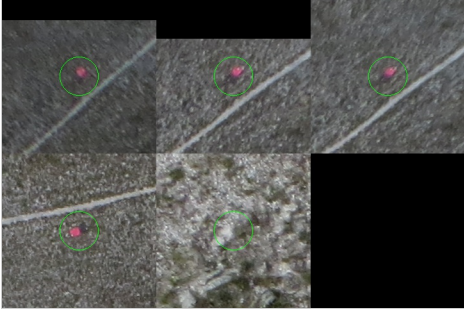
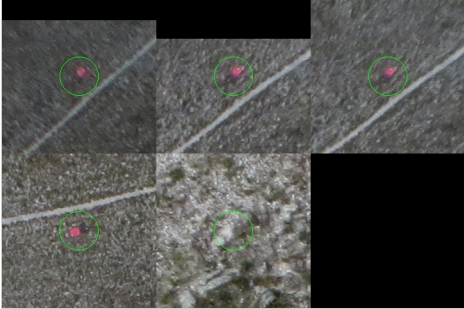
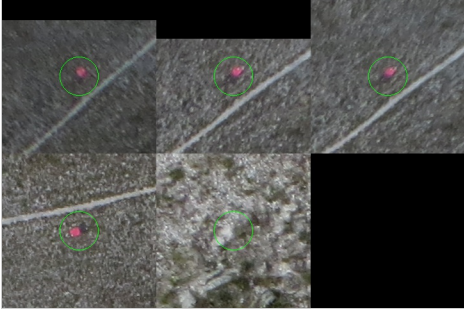
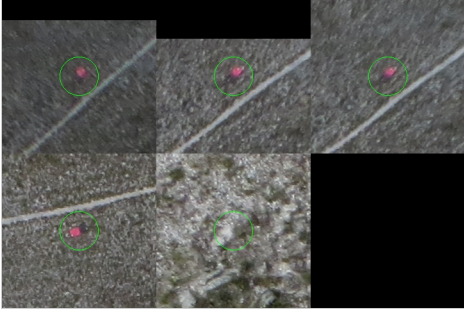
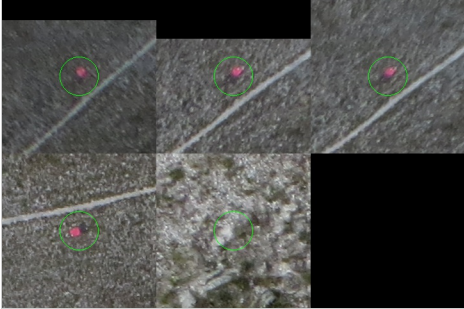
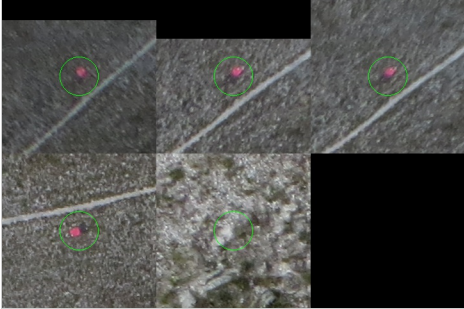
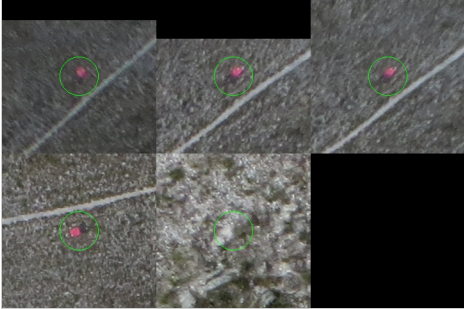
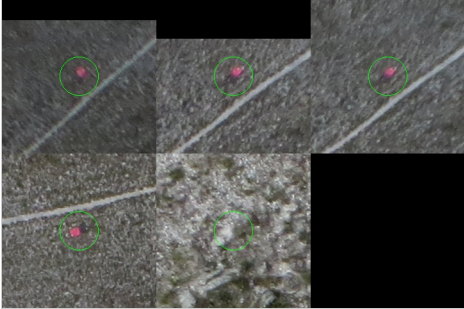
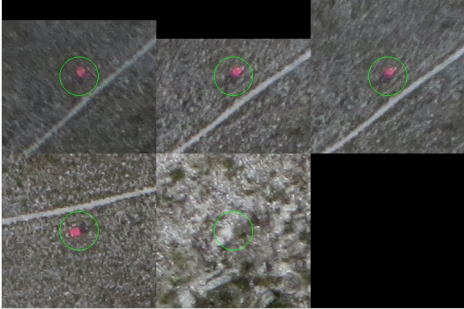
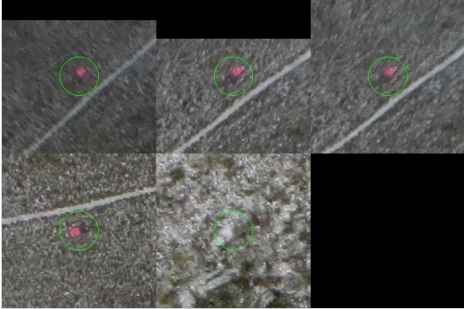
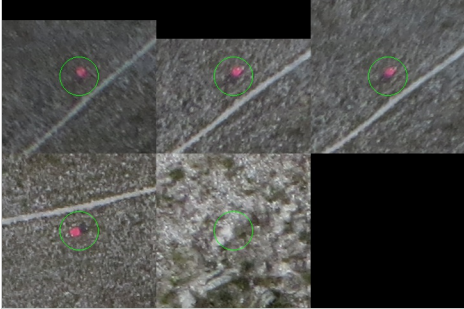
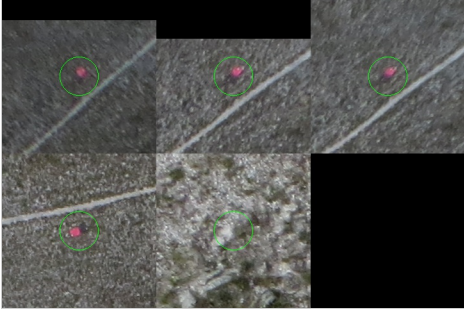
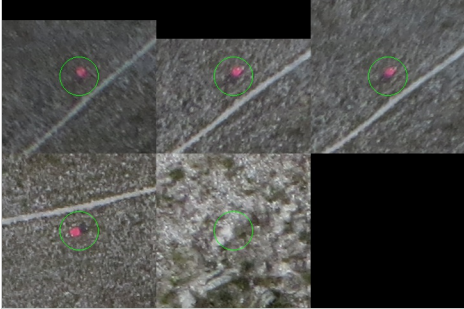
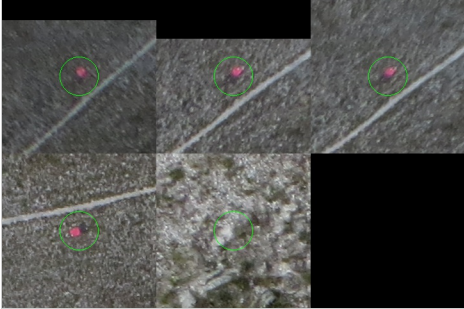
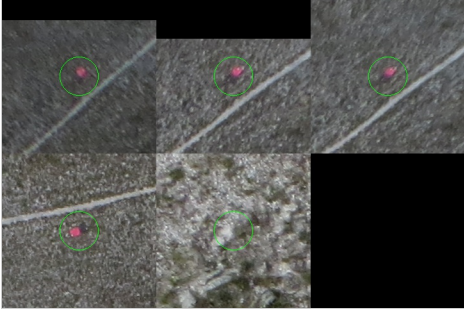
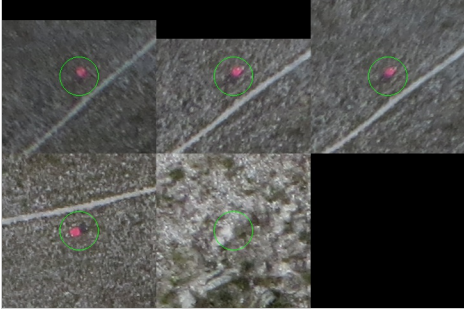
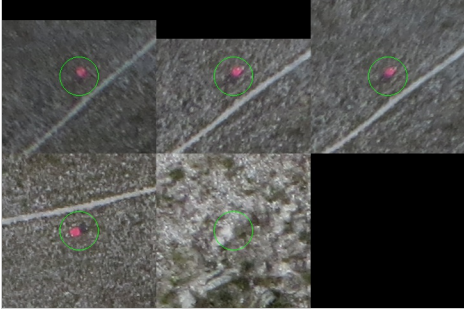
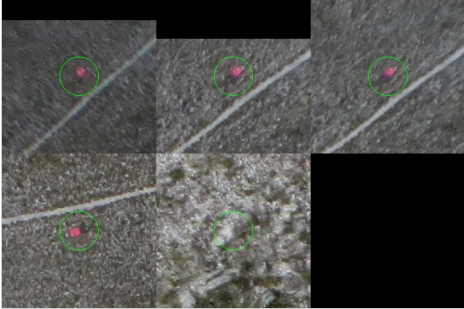
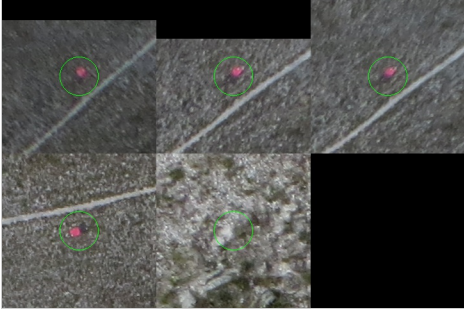
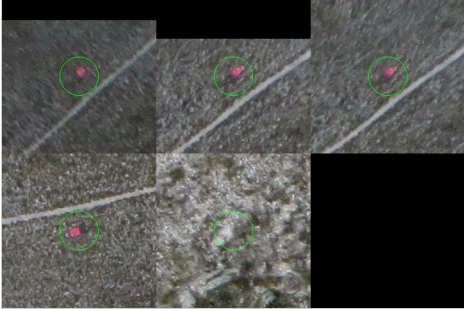
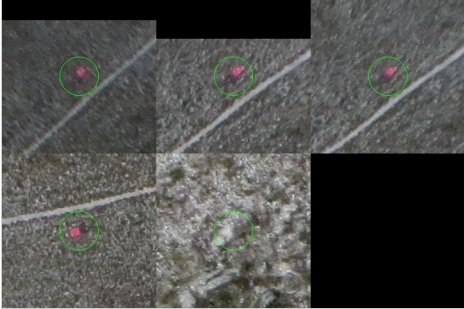
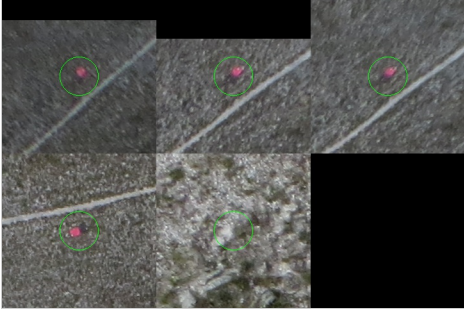
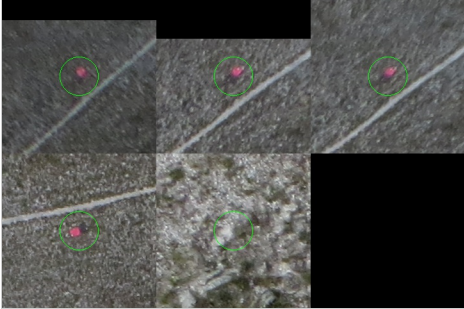
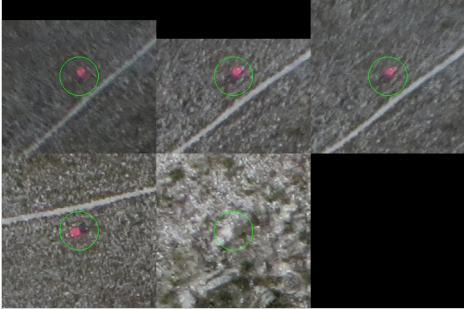
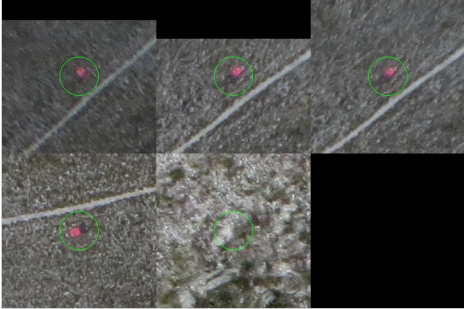
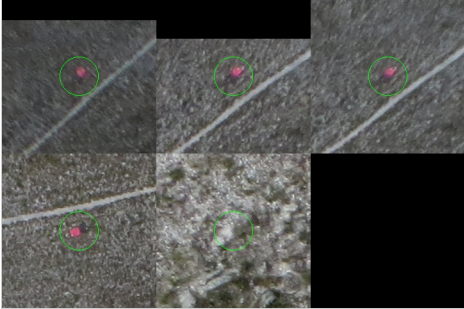
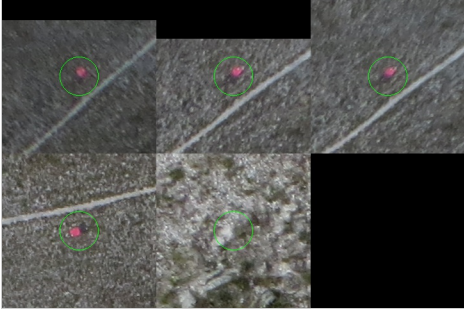
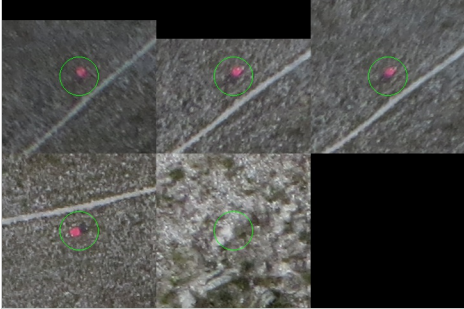
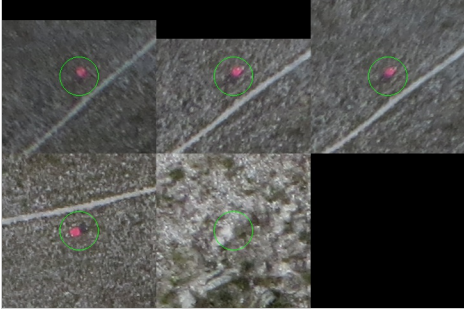
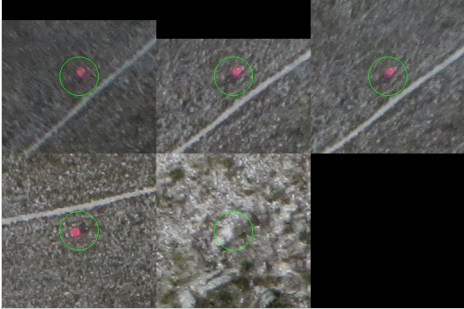
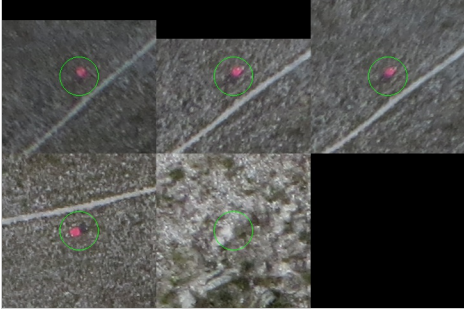
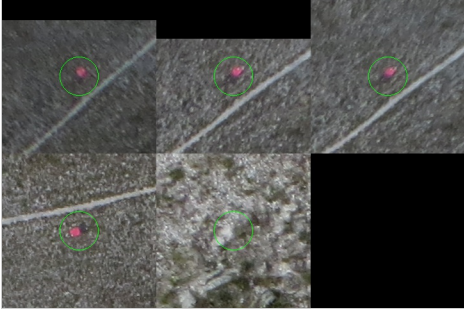
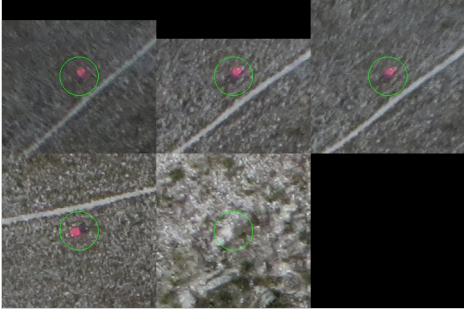
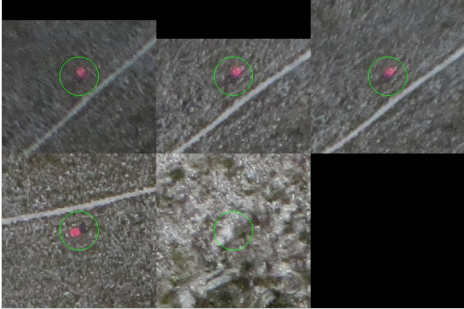
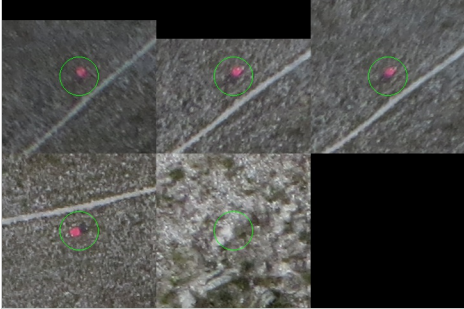
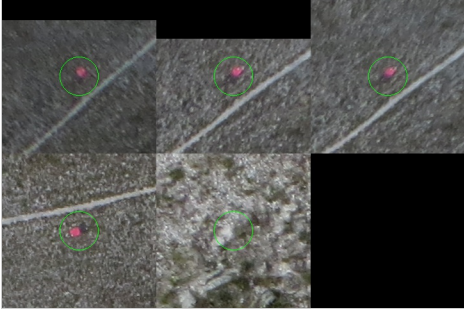
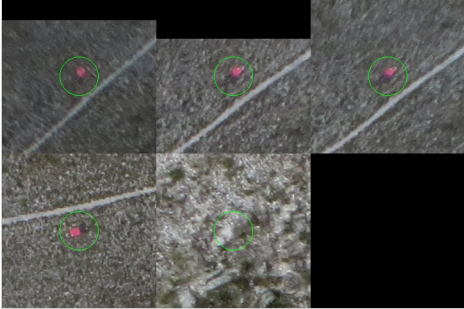
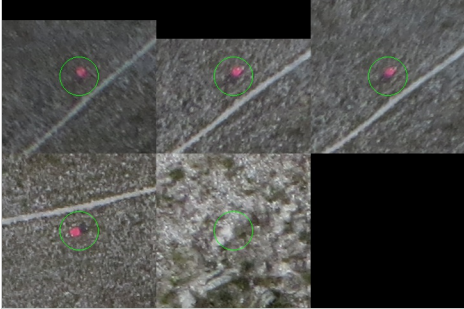
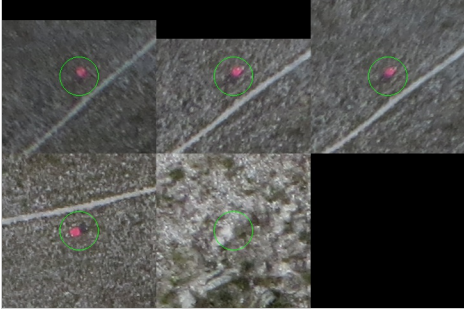
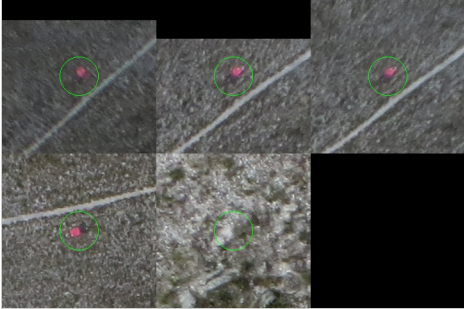
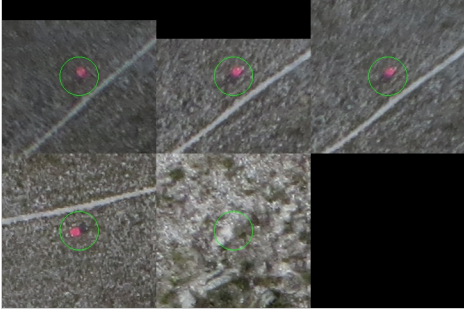
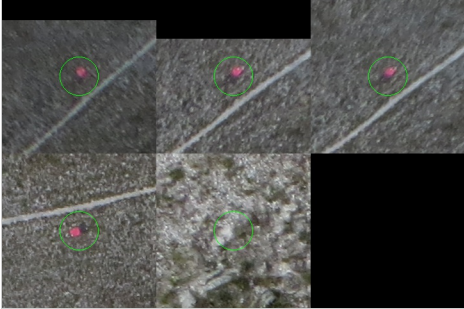
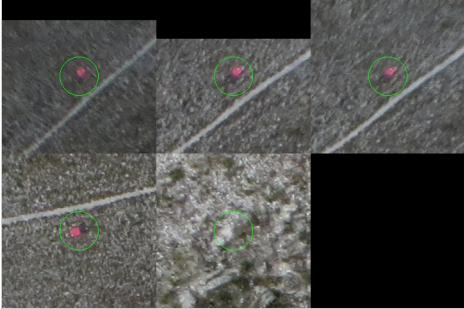
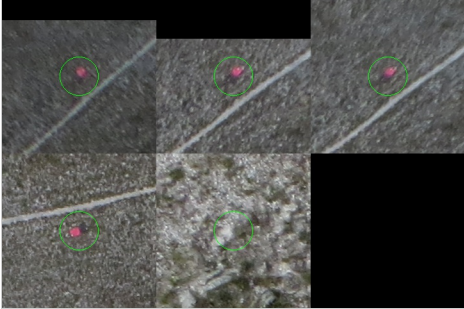
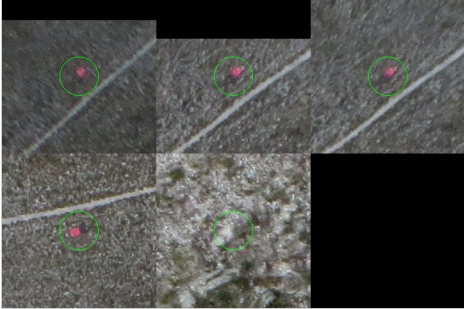
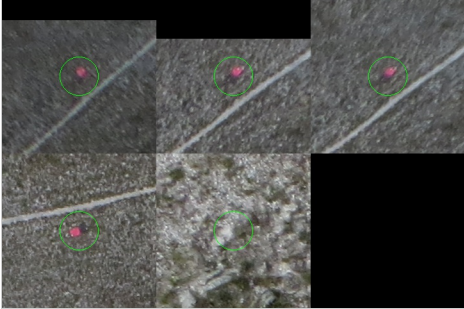
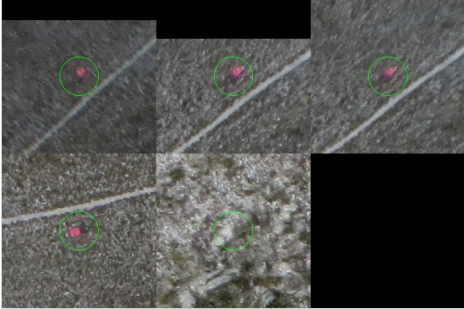
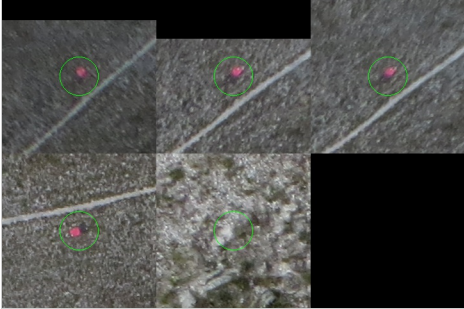
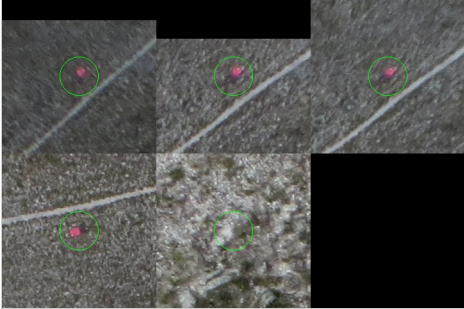
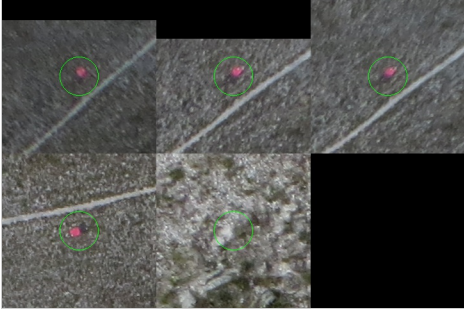
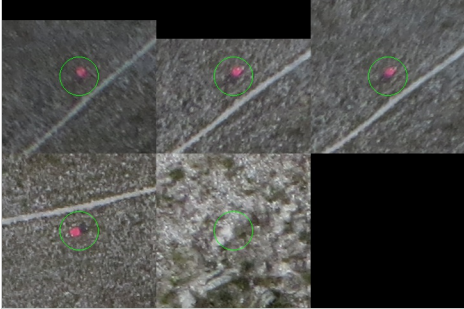
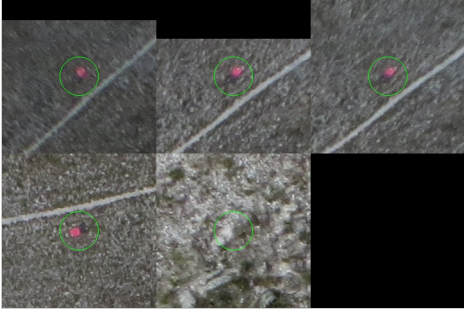
Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	16.40	3.46	73.67
[-2.00, 2.00]	46.88	8.08	90.30
[-3.00, 3.00]	70.44	15.70	91.22
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

? Georeference Verification



GCP Name: Morro_vellozia (646595.000,7873973.000,1274.937)			
			IMG_7391.JPG
			IMG_7392.JPG
			IMG_7393.JPG
			IMG_7394.JPG
			IMG_7395.JPG
			IMG_7396.JPG
			IMG_7397.JPG
			IMG_7398.JPG
			IMG_7408.JPG
			IMG_7412.JPG
			IMG_7413.JPG
			IMG_7446.JPG
			IMG_7448.JPG
			IMG_7449.JPG
			IMG_7450.JPG
			IMG_7451.JPG
			IMG_7452.JPG
			IMG_7453.JPG
			IMG_7466.JPG
			IMG_7468.JPG
			IMG_7469.JPG
			IMG_7470.JPG
			IMG_7598.JPG

GCP Name: Decolagem (646722.000,7873851.000,1276.144)	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	
	

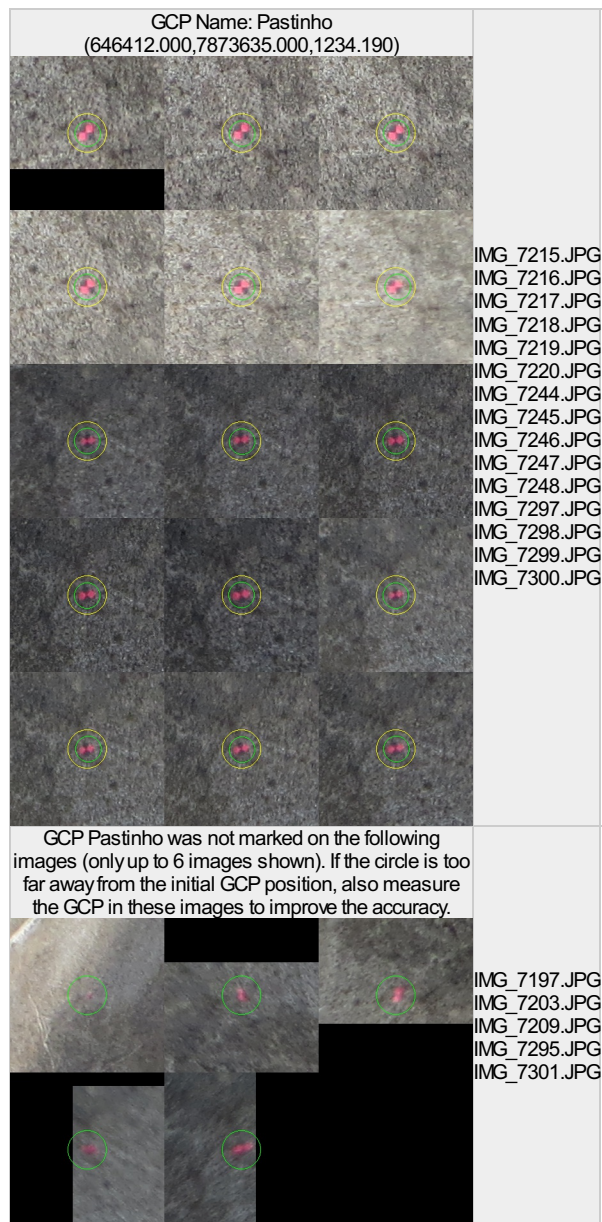


Figure 7: Images in which GCPs have been marked (yellow circle) and in which their computed 3D points have been projected (green circle). A green circle outside of the yellow circle indicates either an accuracy issue or a GCP issue.

Processing Options



Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4810MQ CPU @ 2.80GHz RAM: 16GB GPU: Intel(R) HD Graphics 4600 (Driver: 10.18.10.3431), NVIDIA GeForce GTX 880M (Driver: 9.18.13.3266), RDPDD Chained DD (Driver: unknown), RDP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Professional, 64-bit
Camera Model Name	CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS84 / UTMzone 23S
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 23S
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic

Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: yes
-----------------------	--

Point Cloud Densification details ?

Processing Options ?

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	4
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Densification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Advanced: Point Cloud Classification (beta)	yes, Minimum Object Length [m]: 0.1, Maximum Object Length [m]: 400, Minimum Object Height [m]: 0.1
Time for Point Cloud Densification	05h:54m:30s
Time for Point Cloud Classification	01h:44m:06s
Time for 3D Textured Mesh Generation	19m:41s

Results ?

Number of Processed Clusters	3
Number of Generated Tiles	17
Number of 3D Densified Points	116173181
Average Density (per m ³)	72.59

DSM, Orthomosaic and Index Details ?

Processing Options ?

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (5.24 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	01h:57m:31s
Time for Orthomosaic Generation	57m:41s

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro - Non-Commercial version 2.0.100



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	cedro_200616
Processed	2016-06-30 15:04:24
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.82 cm / 1.89 in
Area Covered	1.2356 km ² / 123.558 ha / 0.4773 sq. mi. / 305.476 acres

Quality Check



Images	median of 57853 keypoints per image	
Dataset	490 out of 498 images calibrated (98%), all images enabled	
Camera Optimization	3.39% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 28417 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.092 m	

Preview

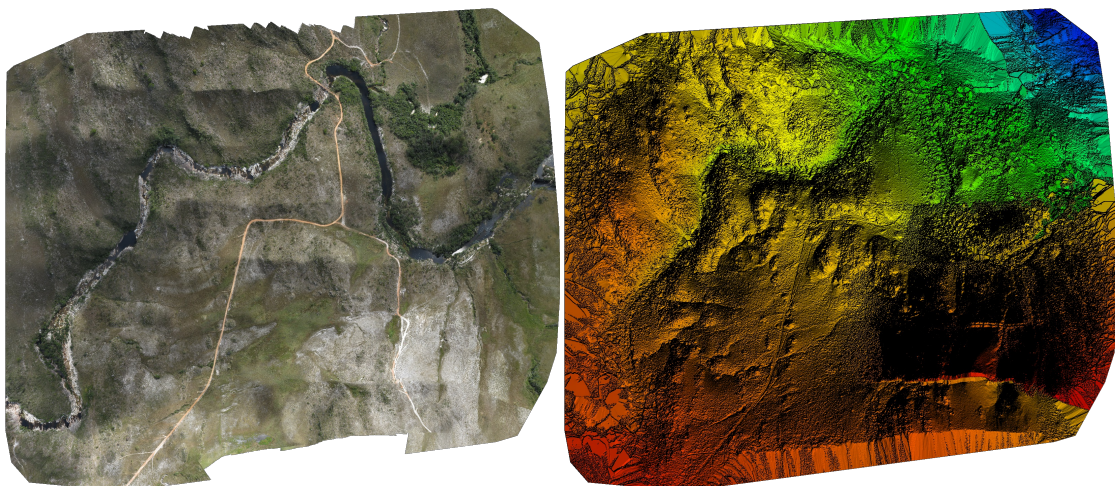


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	490 out of 498
Number of Geolocated Images	498 out of 498

Initial Image Positions



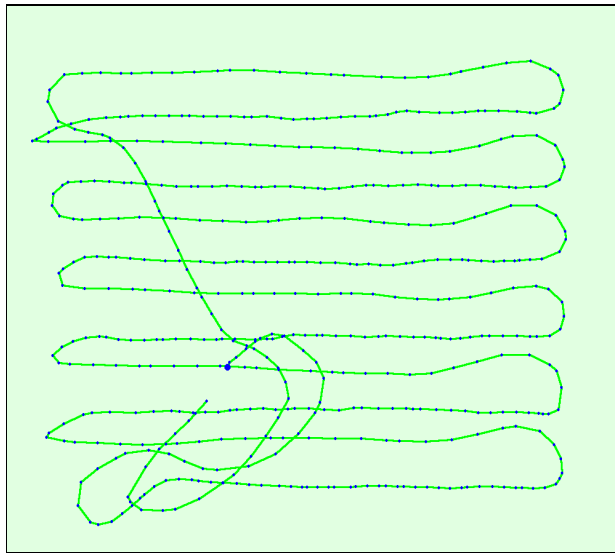


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

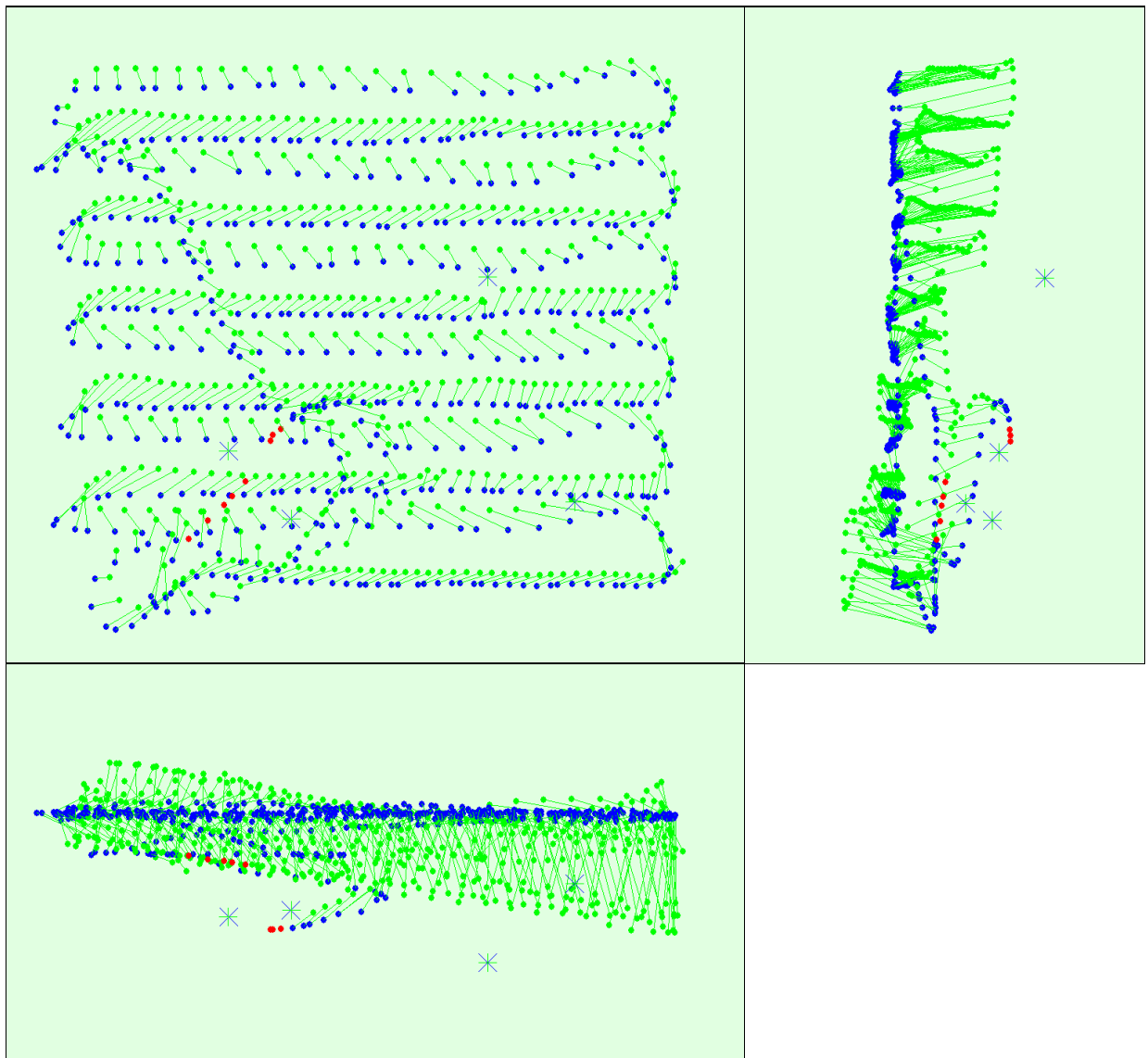


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images.

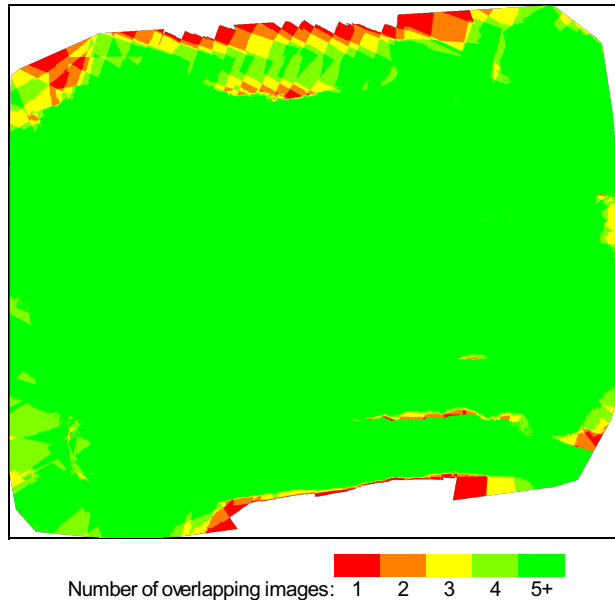


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	14010452
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	4302288
Mean Reprojection Error [pixels]	0.238407

Internal Camera Parameters

CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.198 [mm] x 4.648 [mm]

EXIF ID: CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2904.350 [pixel] 4.500 [mm]	2000.000 [pixel] 3.099 [mm]	1500.000 [pixel] 2.324 [mm]	-0.013	0.005	-0.002	0.006	-0.003
Optimized Values	3002.827 [pixel] 4.653 [mm]	1962.471 [pixel] 3.041 [mm]	1547.882 [pixel] 2.398 [mm]	-0.013	-0.012	0.017	0.004	-0.004



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	57853	28417
Mn	32287	2994
Max	79675	60351
Mean	57162	28593

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	2415009
In 3 Images	767339
In 4 Images	388747
In 5 Images	234278
In 6 Images	153865
In 7 Images	105593
In 8 Images	74194
In 9 Images	48264
In 10 Images	32078
In 11 Images	22425
In 12 Images	16075
In 13 Images	11870
In 14 Images	8665
In 15 Images	6369
In 16 Images	4701
In 17 Images	3356
In 18 Images	2255
In 19 Images	1756
In 20 Images	1308
In 21 Images	1075
In 22 Images	744
In 23 Images	595
In 24 Images	449
In 25 Images	362
In 26 Images	312
In 27 Images	203
In 28 Images	163
In 29 Images	86
In 30 Images	62
In 31 Images	32
In 32 Images	21
In 33 Images	17
In 34 Images	14
In 35 Images	4
In 36 Images	2

? 2D Keypoint Matches

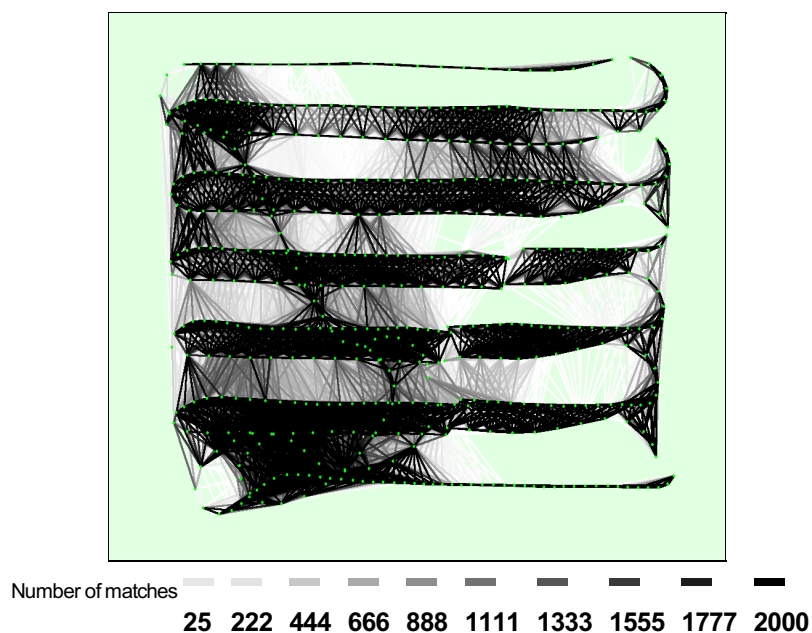


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Geolocation Details



? Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
Anvoro_rio (3D)	0.020/ 0.020	0.190	0.091	-0.001	1.040	27 / 27
Bruna (3D)	0.020/ 0.020	-0.122	0.059	-0.114	2.076	12 / 13
morro_branco (3D)	0.020/ 0.020	-0.007	-0.019	0.037	0.893	8 / 8
km1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.151	-0.128	0.023	0.675	24 / 24
Mean [m]		-0.022578	0.000756	-0.013804		
Sigma [m]		0.133995	0.084154	0.059615		
RMS Error [m]		0.135883	0.084158	0.061192		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified v.s. manually marked.

? Absolute Geolocation Variance



0 out of 490 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X[%]	Geolocation Error Y[%]	Geolocation Error Z[%]
-	-15.00	46.33	11.84	39.59
-15.00	-12.00	2.65	2.45	2.24
-12.00	-9.00	1.43	3.27	1.84
-9.00	-6.00	1.22	8.98	2.04
-6.00	-3.00	1.43	11.43	1.84
-3.00	0.00	3.27	17.96	2.86
0.00	3.00	1.84	12.04	3.06
3.00	6.00	3.06	6.73	2.65
6.00	9.00	1.63	7.55	2.04
9.00	12.00	1.22	6.33	2.45
12.00	15.00	1.43	2.24	1.63
15.00	-	34.49	9.18	37.76
Mean [m]		-14.675380	-25.978307	31.914097
Sigma [m]		33.208663	16.599983	60.785051
RMS Error [m]		36.306777	30.829076	68.653711

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-14.675380	-25.978307	31.914097

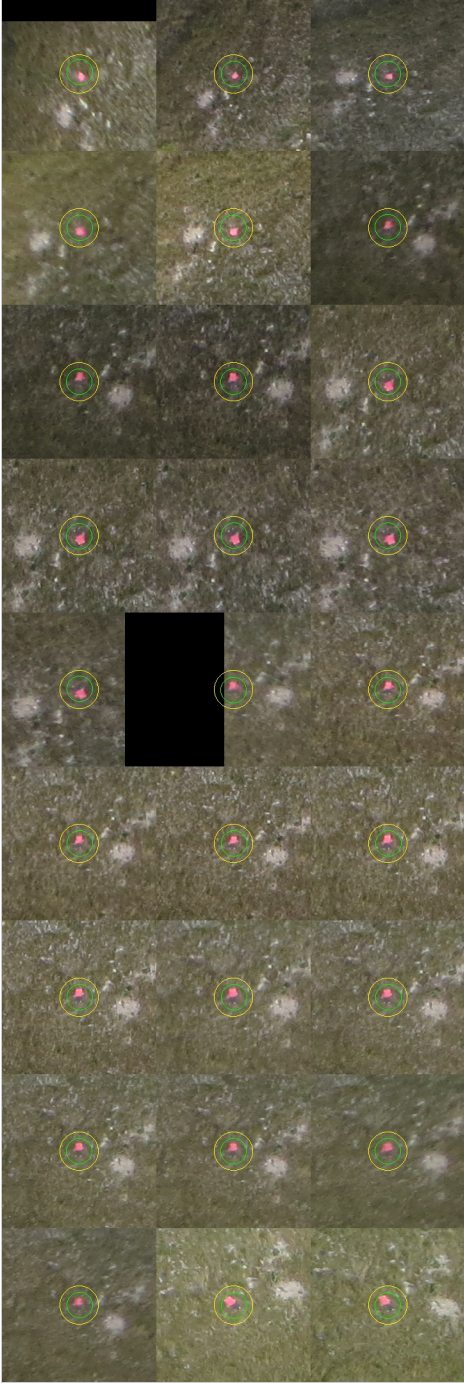
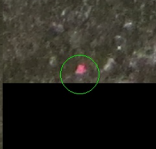
Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

? Relative Geolocation Variance

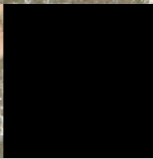


Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	8.37	44.08	15.71
[-2.00, 2.00]	12.86	67.76	30.00
[-3.00, 3.00]	19.18	78.98	45.51
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

GCP Name: Arvore_rio (649253.000,7872837.000,1086.086)		
		
		  
		  
		  
		  
		  
		  
		  
		  
		  
GCP Arvore_rio was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.		
		  

GCP Name: Bruna
(649634.000,7873093.000,1018.900)



IMG_6286.JPG
IMG_6287.JPG
IMG_6292.JPG
IMG_6313.JPG
IMG_6314.JPG
IMG_6315.JPG
IMG_6316.JPG
IMG_6361.JPG
IMG_6362.JPG
IMG_6363.JPG
IMG_6364.JPG
IMG_6365.JPG
IMG_6366.JPG

GCP Name: morro_branco
(649762.000,7872762.000,1135.169)



IMG_6098.JPG
IMG_6099.JPG
IMG_6149.JPG
IMG_6150.JPG
IMG_6151.JPG
IMG_6152.JPG
IMG_6153.JPG
IMG_6154.JPG

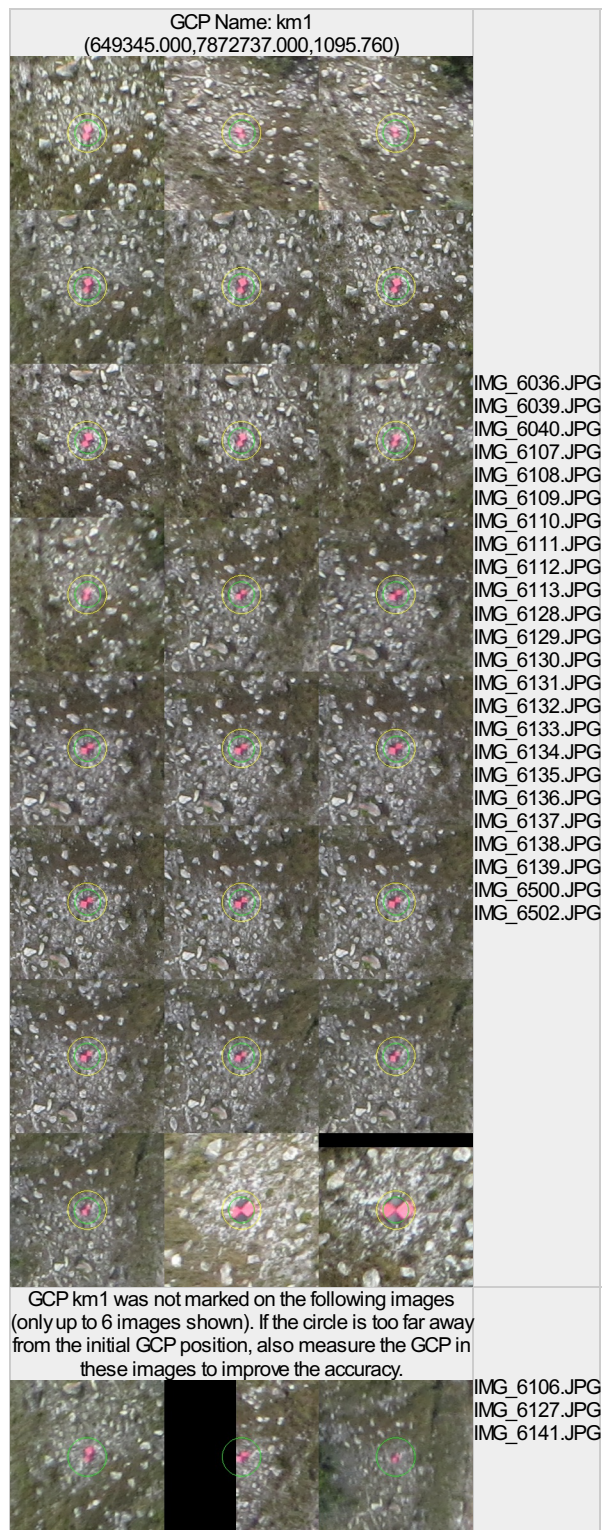


Figure 7: Images in which GCPs have been marked (yellow circle) and in which their computed 3D points have been projected (green circle). A green circle outside of the yellow circle indicates either an accuracy issue or a GCP issue.

Processing Options



Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4810MQ CPU @ 2.80GHz RAM: 16GB GPU: Intel(R) HD Graphics 4600 (Driver: 10.18.10.3431), NVIDIA GeForce GTX 880M (Driver: 9.18.13.3266), RDPDD Chained DD (Driver: unknown), RDP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Professional, 64-bit
Camera Model Name	CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS84 / UTM zone 23S

Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 23S
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	4
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Densification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Advanced: Point Cloud Classification (beta)	yes, Minimum Object Length [m]: 0.1, Maximum Object Length [m]: 400, Minimum Object Height [m]: 0.1
Time for Point Cloud Densification	05h:37m:07s
Time for Point Cloud Classification	01h:52m:50s
Time for 3D Textured Mesh Generation	21m:22s

Results

Number of Processed Clusters	4
Number of Generated Tiles	15
Number of 3D Densified Points	138194748
Average Density (per m ³)	69.41

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (4.83 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	01h:58m:56s
Time for Orthomosaic Generation	54m:46s

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro - Non-Commercial version 2.0.100



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	q16_s260_220616
Processed	2016-07-08 11:04:41
Average Ground Sampling Distance (GSD)	6.68 cm / 2.63 in
Area Covered	1.6087 km ² / 160.869 ha / 0.6214 sq. mi. / 397.722 acres

Quality Check



Images	median of 42306 keypoints per image	
Dataset	563 out of 574 images calibrated (98%), all images enabled	
Camera Optimization	3.42% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 25335.6 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 3 GCPs (3 3D), mean RMS error = 0.145 m	

Preview

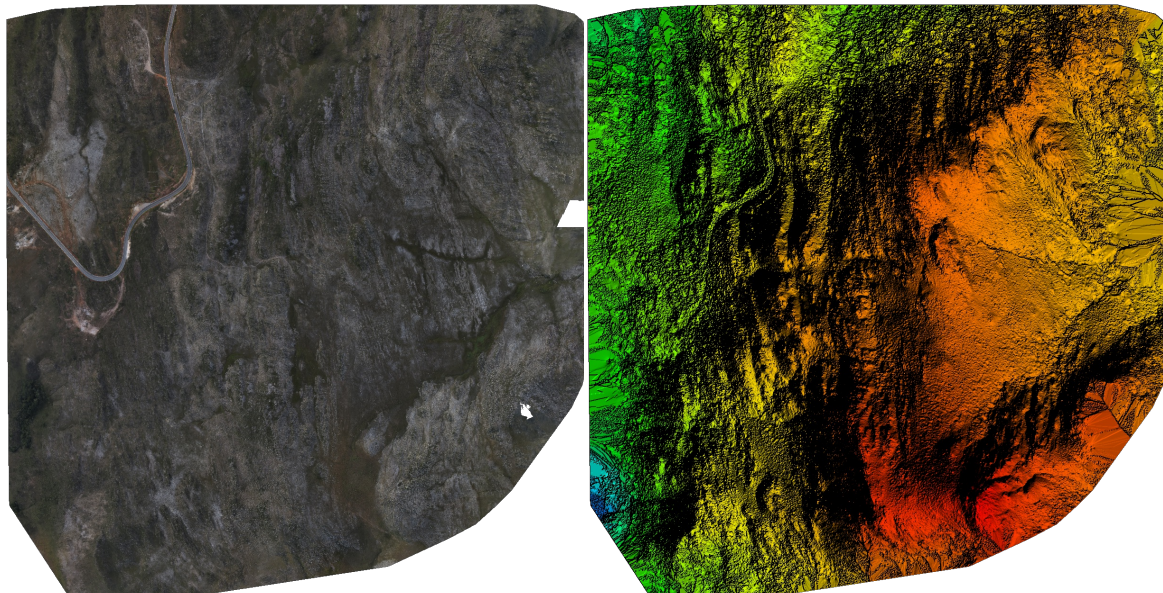


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	563 out of 574
-----------------------------	----------------

? Initial Image Positions

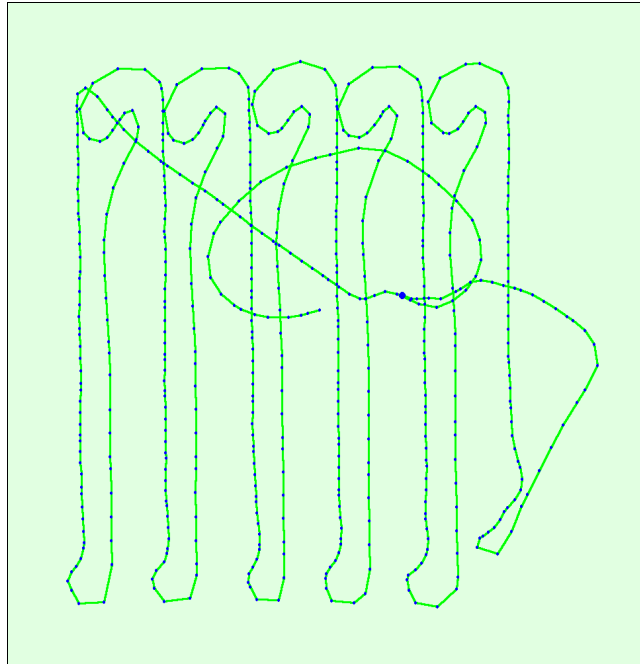
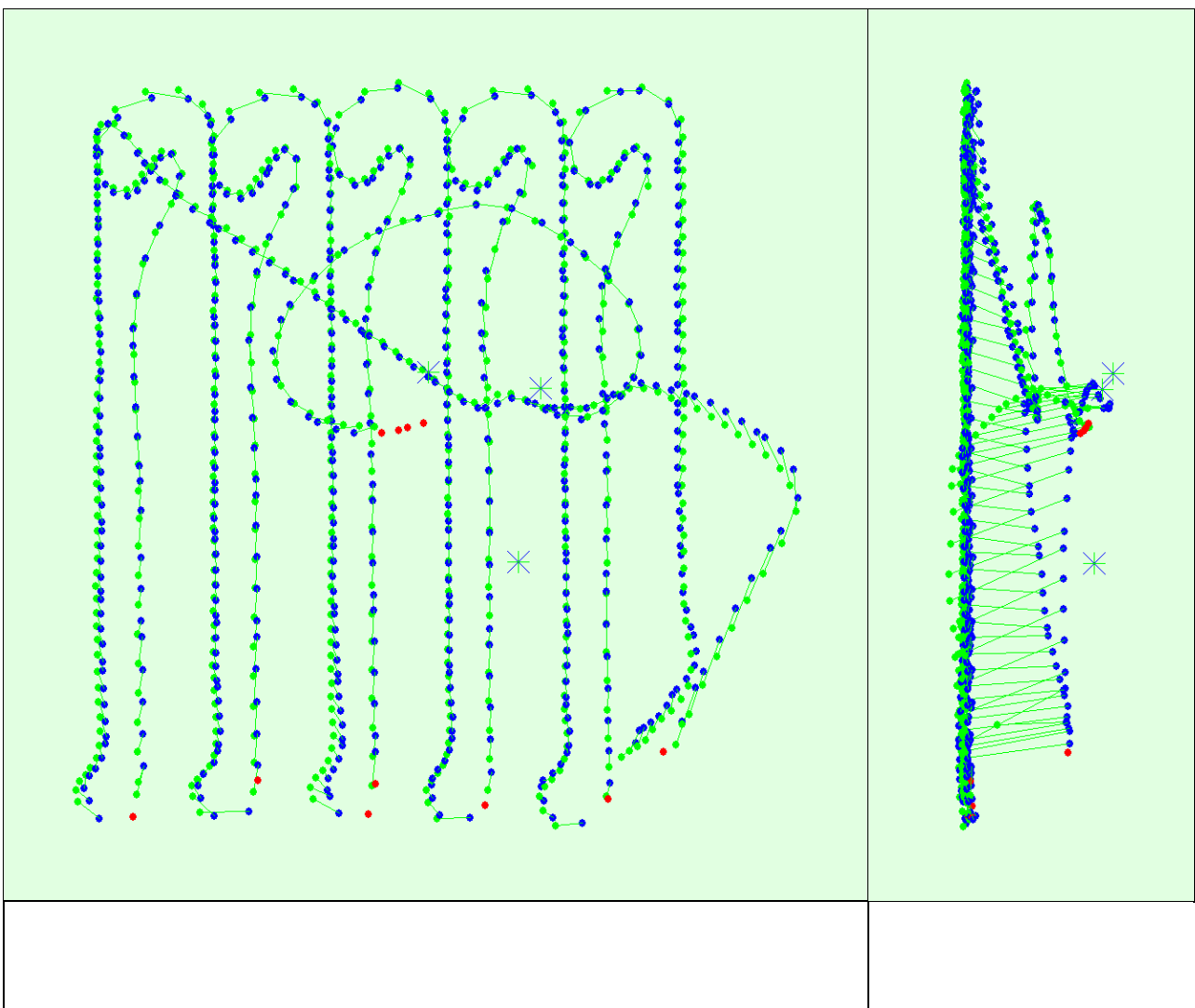


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



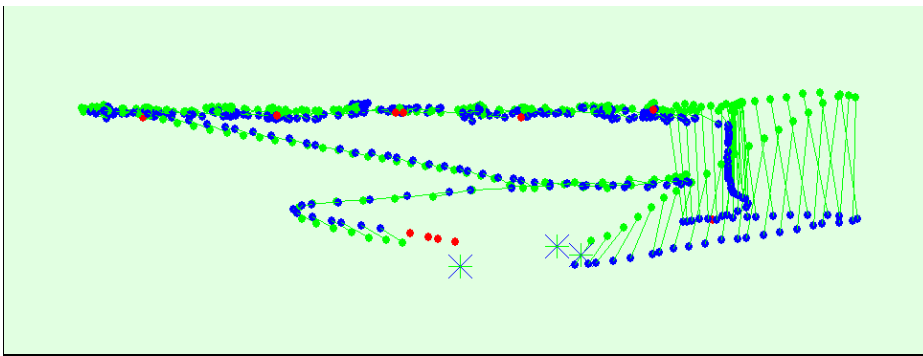


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images.

Overlap

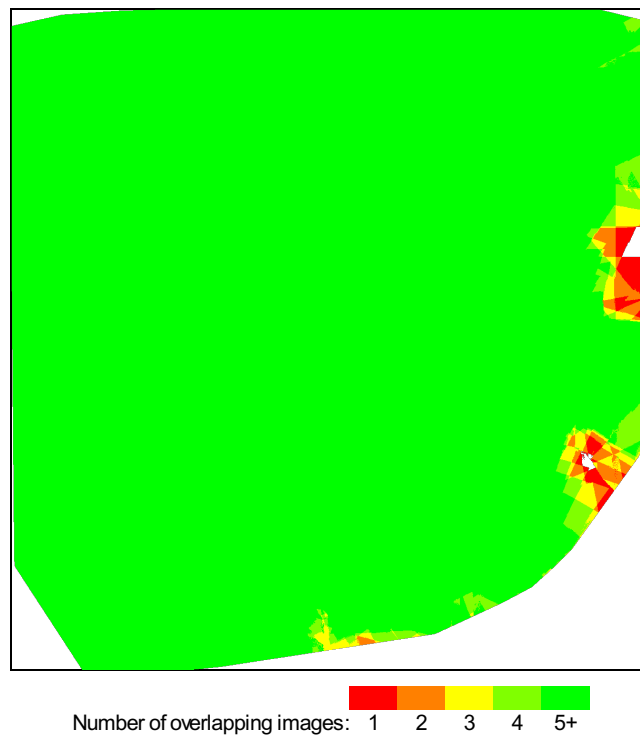


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	14642449
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3328367
Mean Reprojection Error [pixels]	0.247234

Internal Camera Parameters

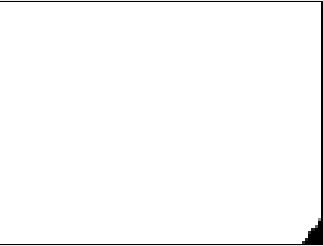
CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.198 [mm] x 4.648 [mm]



EXIF ID: CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2904.350 [pixel] 4.500 [mm]	2000.000 [pixel] 3.099 [mm]	1500.000 [pixel] 2.324 [mm]	-0.013	0.005	-0.002	0.006	-0.003

Optimized Values	3003.721 [pixel] 4.654 [mm]	1981.338 [pixel] 3.070 [mm]	1532.558 [pixel] 2.375 [mm]	-0.013	-0.012	0.014	0.003	-0.002
------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------	--------	-------	-------	--------



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	42306	25336
Min	20780	117
Max	70340	51819
Mean	42903	26008

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1477824
In 3 Images	569071
In 4 Images	324330
In 5 Images	215563
In 6 Images	154527
In 7 Images	116596
In 8 Images	90187
In 9 Images	70776
In 10 Images	56647
In 11 Images	45266
In 12 Images	37210
In 13 Images	30442
In 14 Images	25298
In 15 Images	20595
In 16 Images	17292
In 17 Images	14353
In 18 Images	11650
In 19 Images	9225
In 20 Images	7635
In 21 Images	6122
In 22 Images	4941
In 23 Images	4081
In 24 Images	3230
In 25 Images	2622
In 26 Images	2216
In 27 Images	1650
In 28 Images	1464
In 29 Images	1195
In 30 Images	1025
In 31 Images	875
In 32 Images	751
In 33 Images	612
In 34 Images	499
In 35 Images	433
In 36 Images	395
In 37 Images	313

In 38 Images	241
In 39 Images	210
In 40 Images	177
In 41 Images	130
In 42 Images	112
In 43 Images	104
In 44 Images	81
In 45 Images	51
In 46 Images	55
In 47 Images	42
In 48 Images	42
In 49 Images	34
In 50 Images	30
In 51 Images	25
In 52 Images	24
In 53 Images	19
In 54 Images	26
In 55 Images	13
In 56 Images	7
In 57 Images	5
In 58 Images	8
In 59 Images	2
In 60 Images	7
In 61 Images	4
In 62 Images	3
In 63 Images	1
In 65 Images	2
In 67 Images	1

? 2D Keypoint Matches

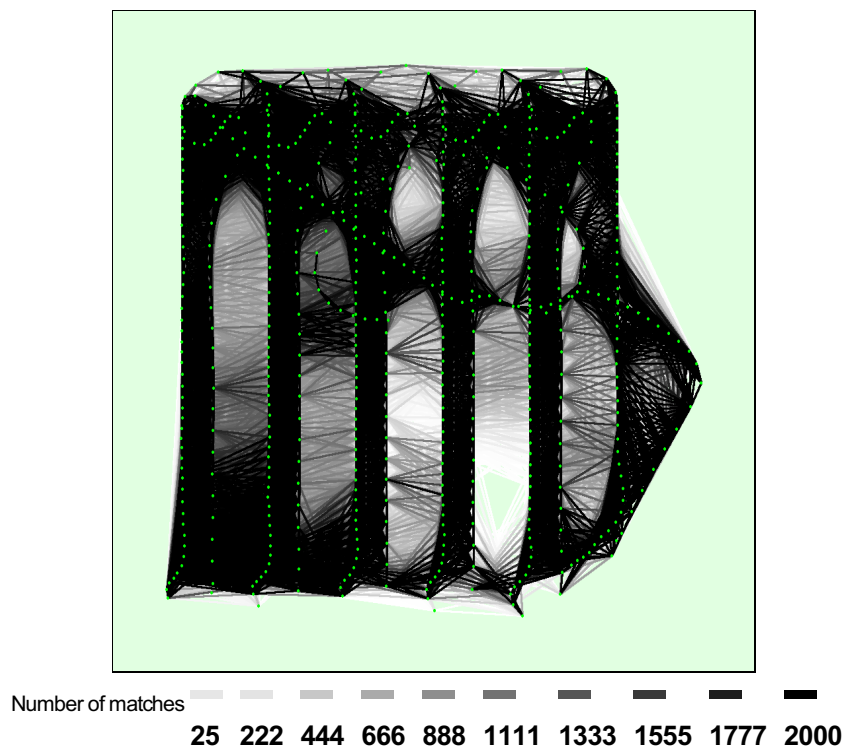


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Geolocation Details



Ground Control Points



GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
Trilha (3D)	0.020/ 0.020	0.238	0.098	-0.036	0.802	31 / 31
Decolagem (3D)	0.020/ 0.020	-0.376	0.064	0.079	1.288	22 / 22
Afloramento (3D)	0.020/ 0.020	0.072	-0.196	0.025	1.094	20 / 20
Mean [m]		-0.021910	-0.011134	0.022543		
Sigma [m]		0.258989	0.131105	0.047031		
RMS Error [m]		0.259914	0.131577	0.052154		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance



0 out of 563 geolocated and calibrated images have been labeled as inaccurate.

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	11.55	44.94	11.90
-15.00	-12.00	3.37	5.33	0.36
-12.00	-9.00	1.95	3.02	0.00
-9.00	-6.00	7.82	3.73	0.36
-6.00	-3.00	9.95	2.84	0.18
-3.00	0.00	22.56	1.07	0.71
0.00	3.00	16.70	1.24	0.71
3.00	6.00	8.70	2.49	6.39
6.00	9.00	3.55	1.95	17.58
9.00	12.00	2.13	1.95	29.84
12.00	15.00	1.42	1.24	15.99
15.00	-	10.30	30.20	15.99
Mean [m]		1.138268	-1.016318	-14.752460
Sigma [m]		14.243395	25.702980	33.651485
RMS Error [m]		14.288805	25.723066	36.743129

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	1.138268	-1.016318	-14.752460

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

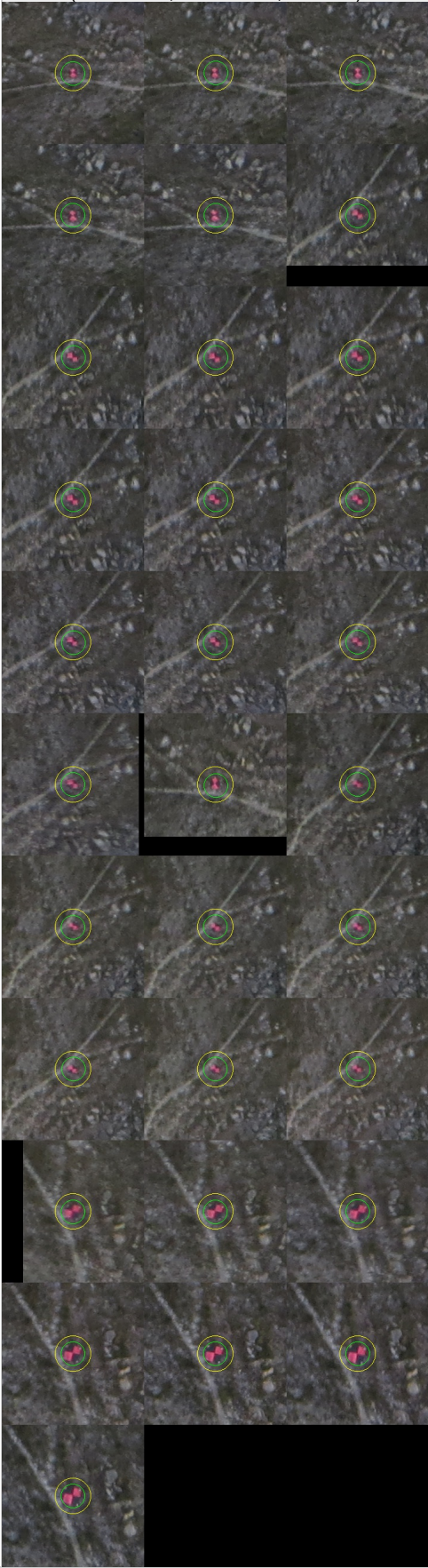
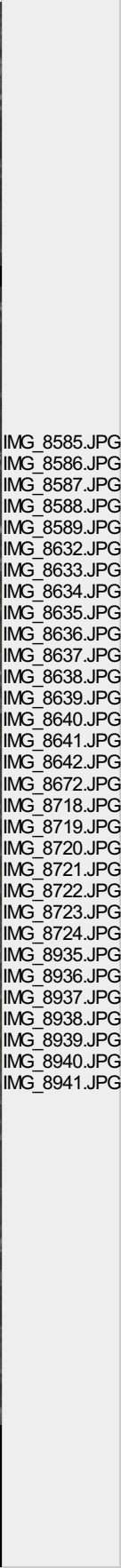
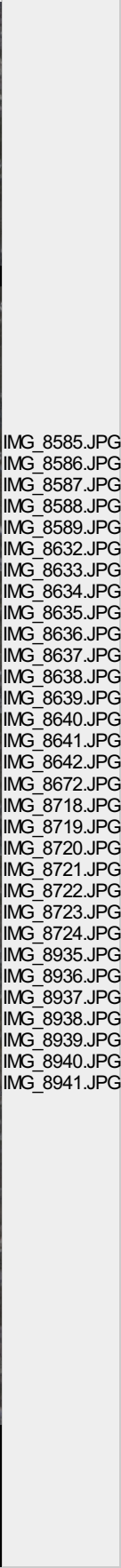
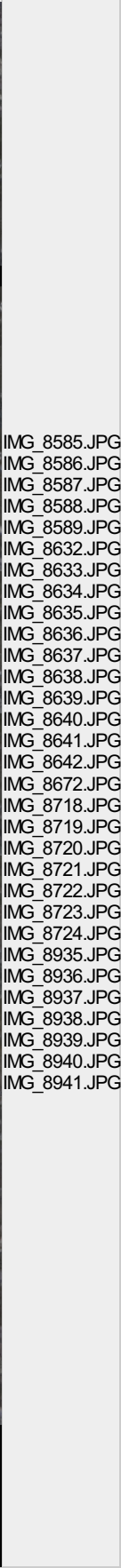
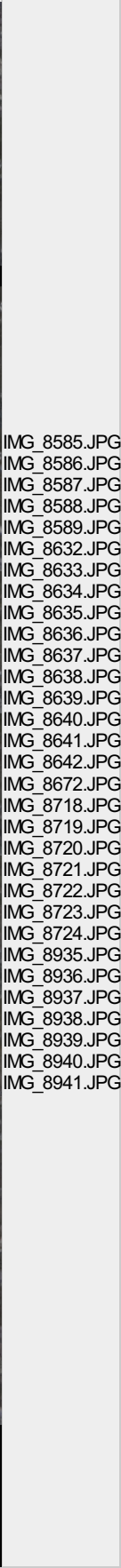
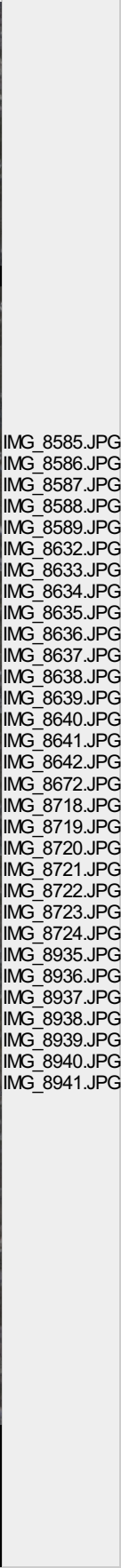
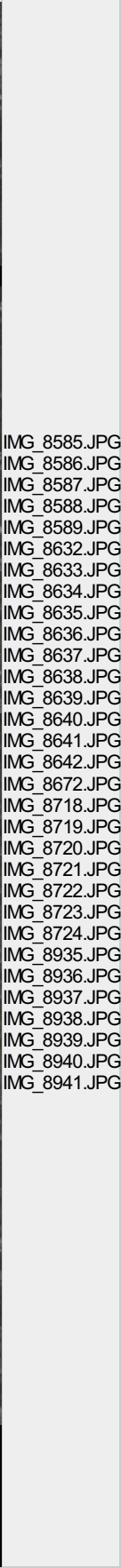
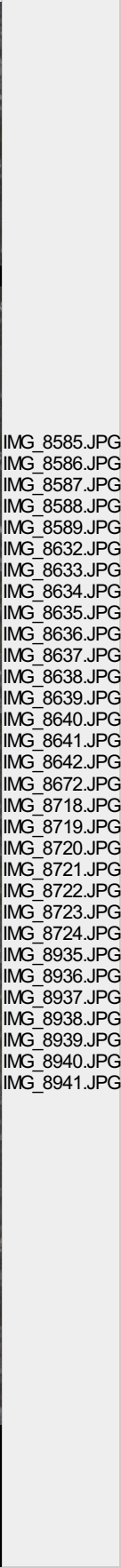
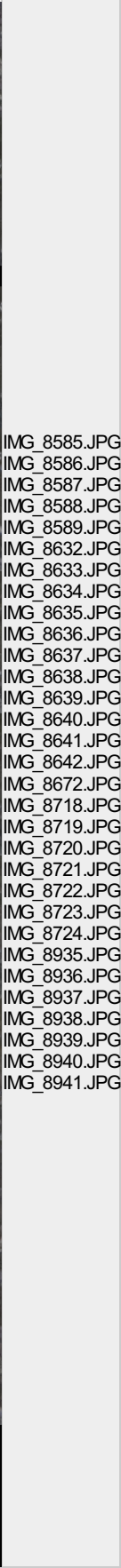
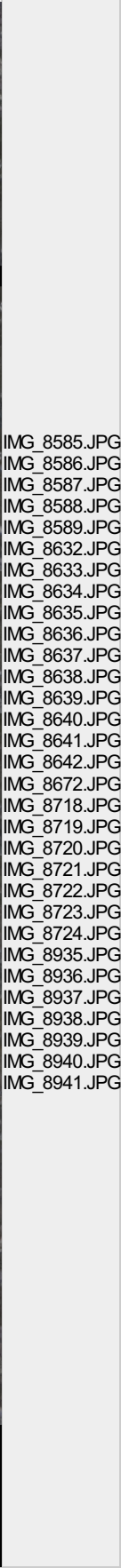
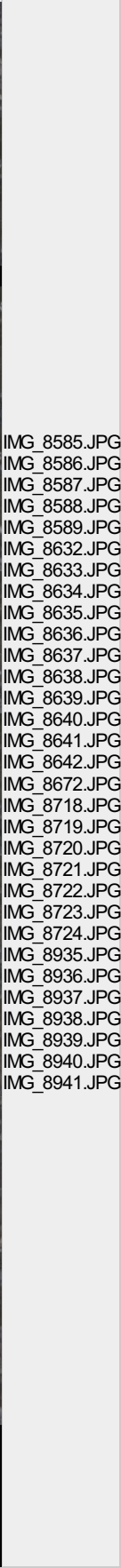
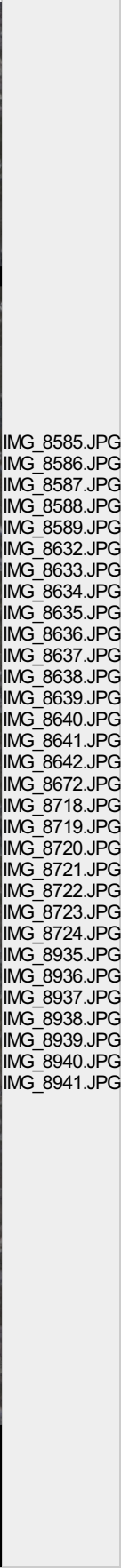
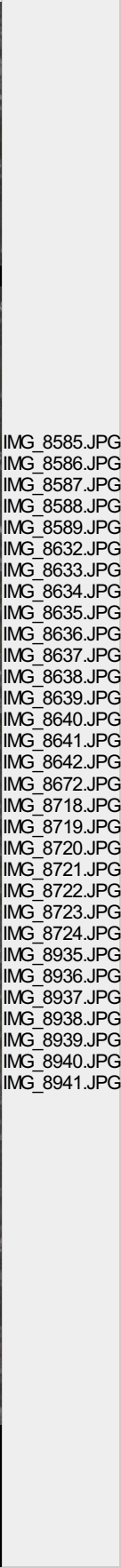
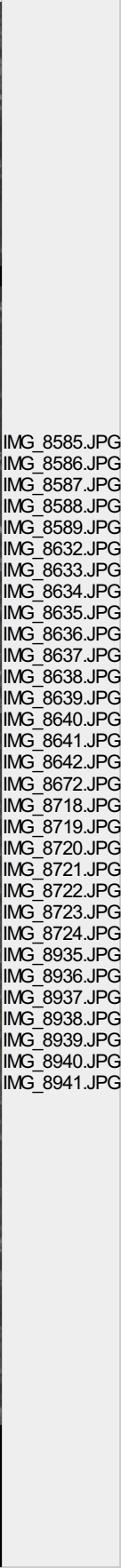
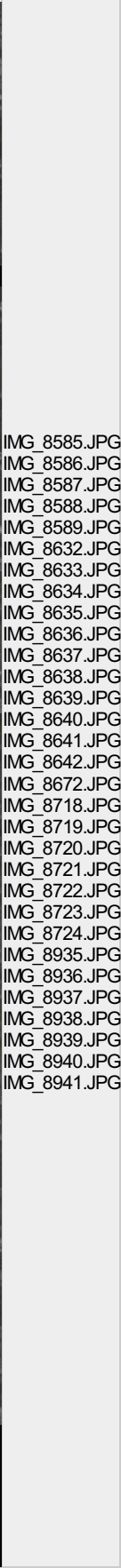
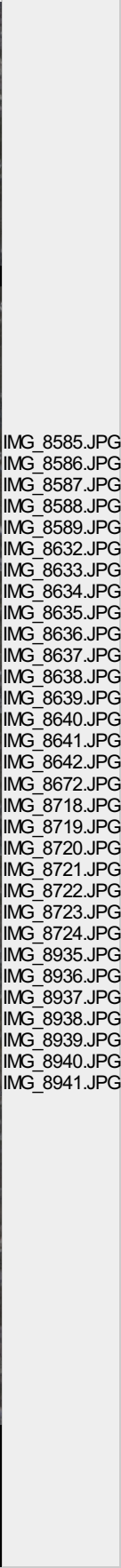
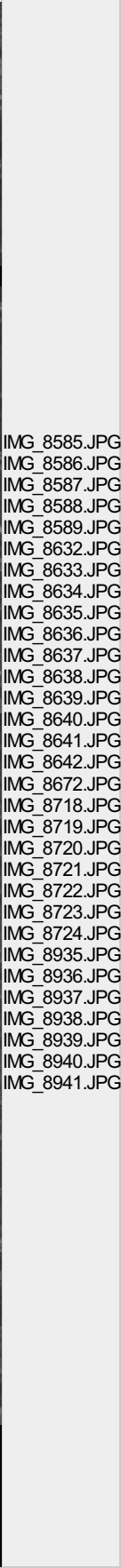
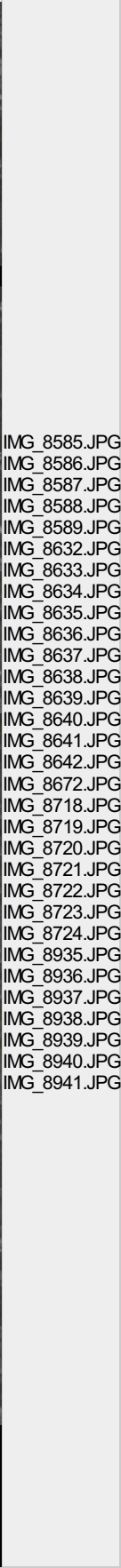
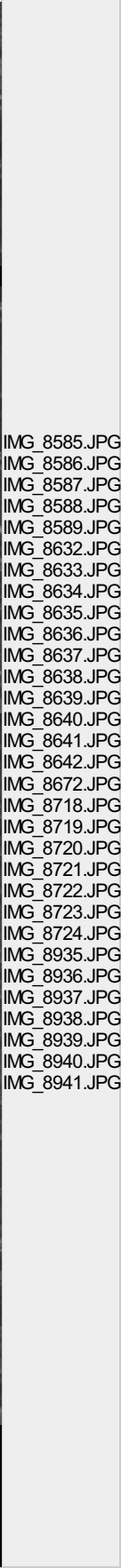
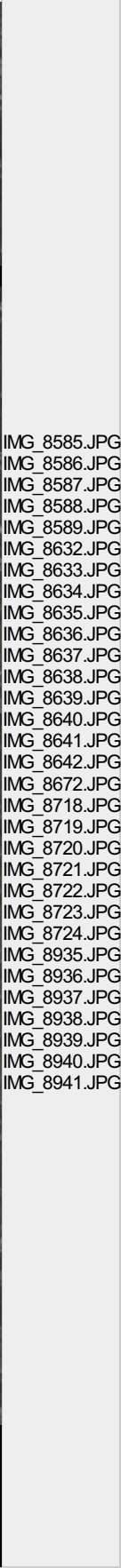
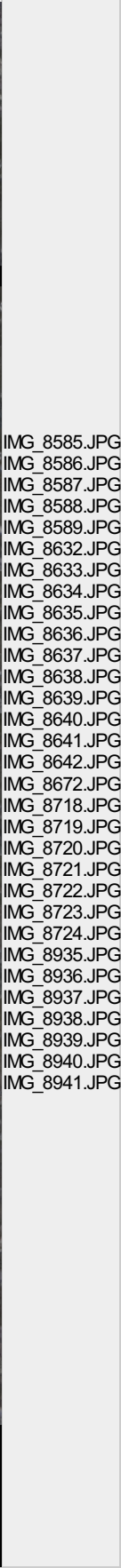
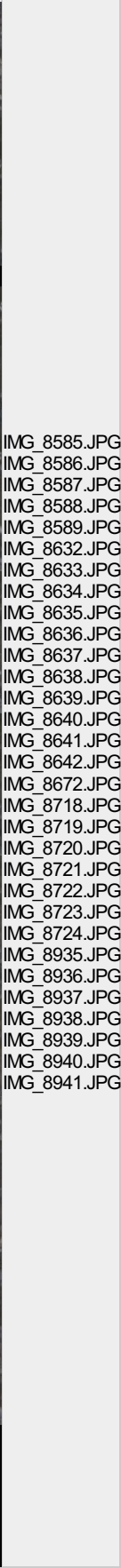
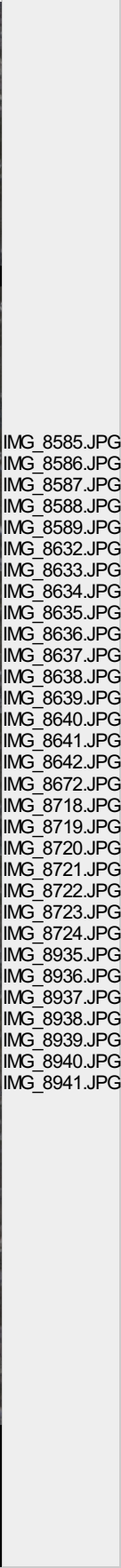
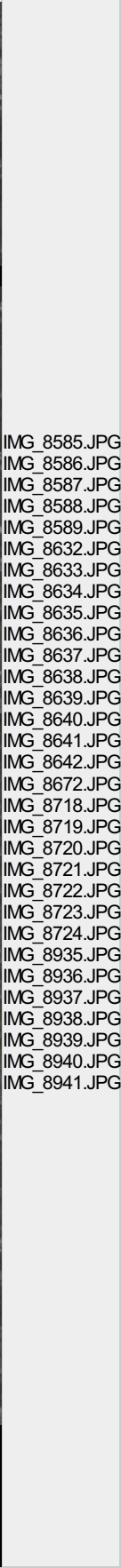
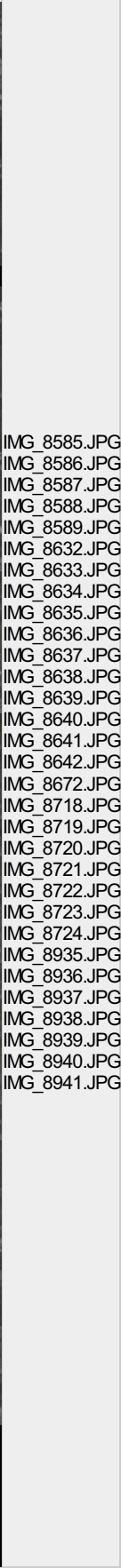
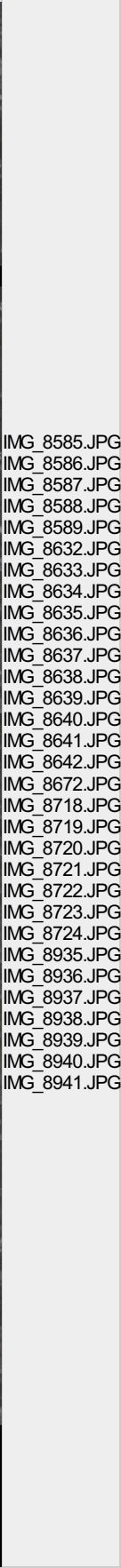
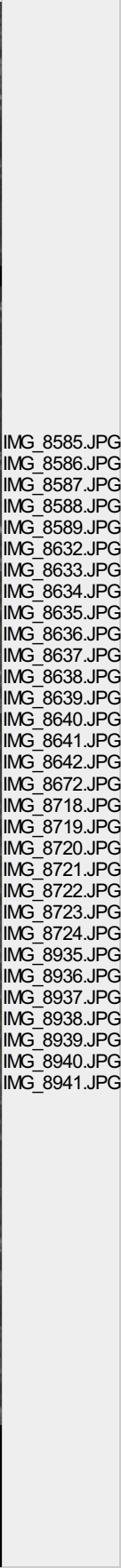
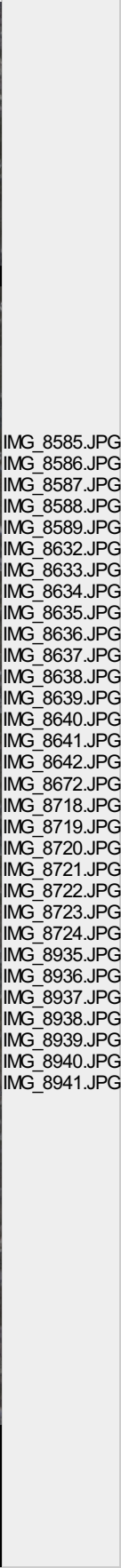
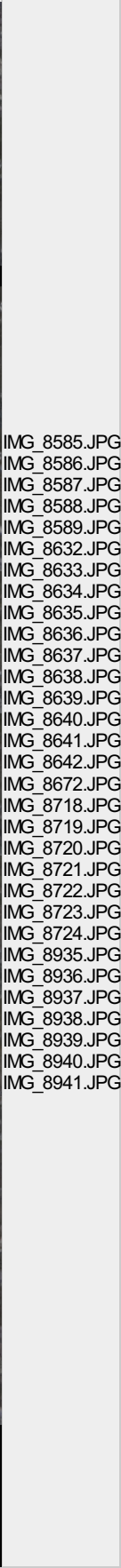
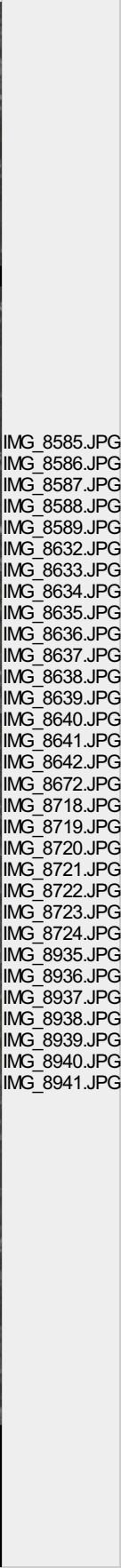
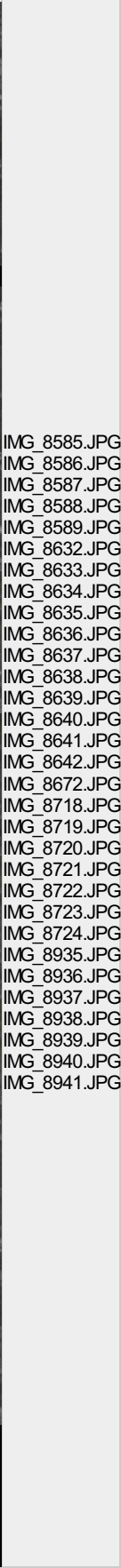
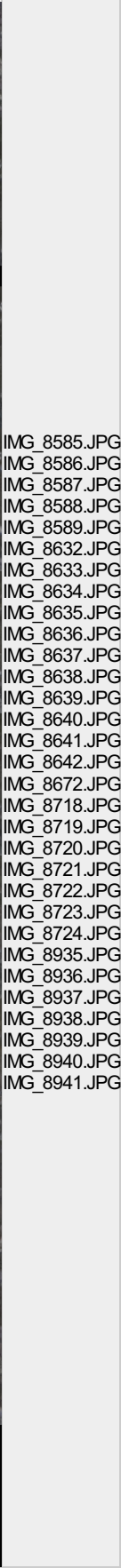
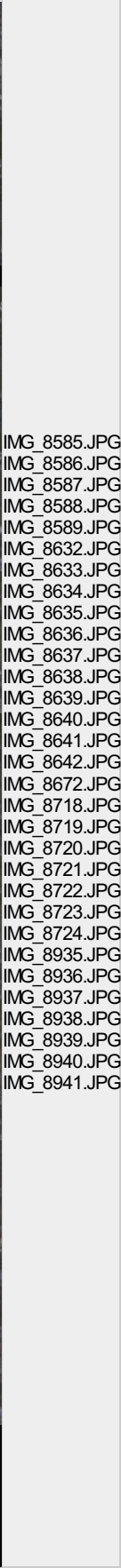
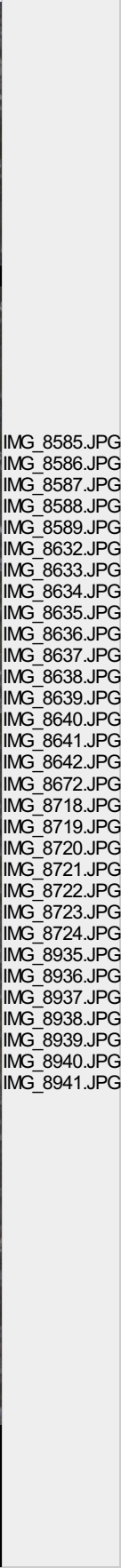
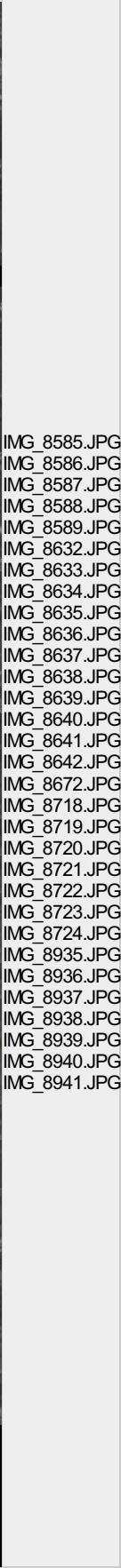
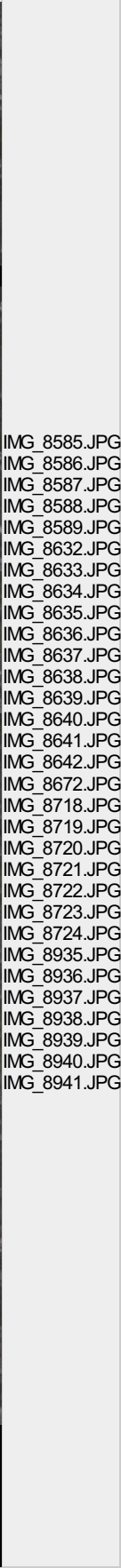
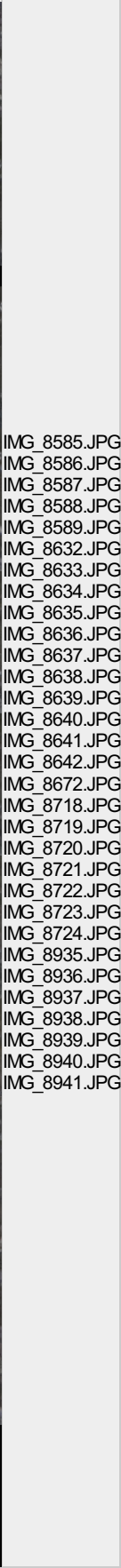
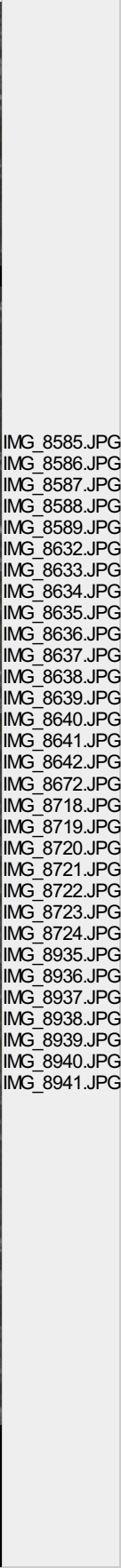
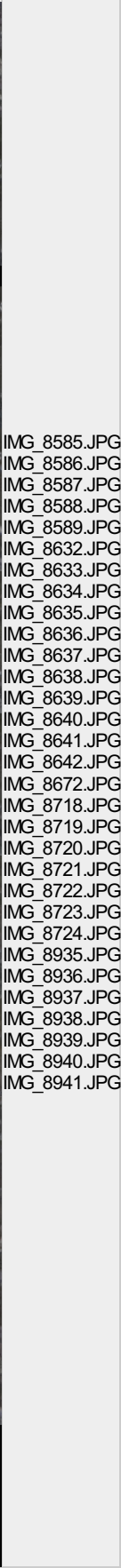
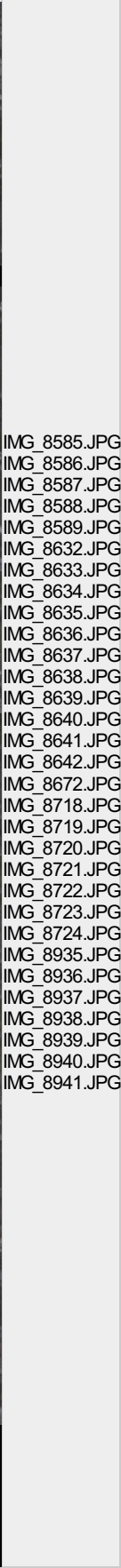
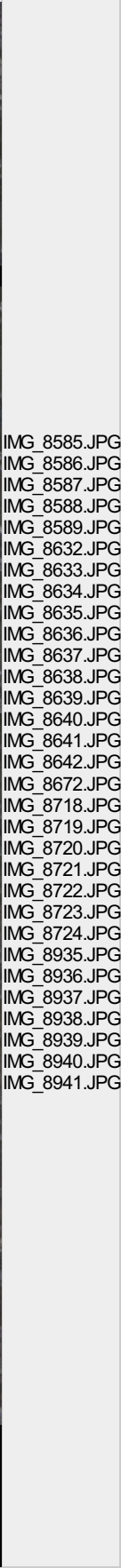
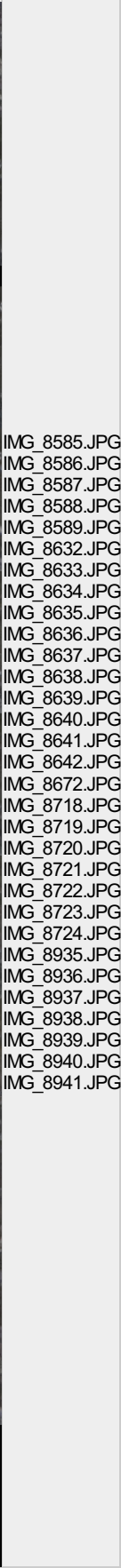
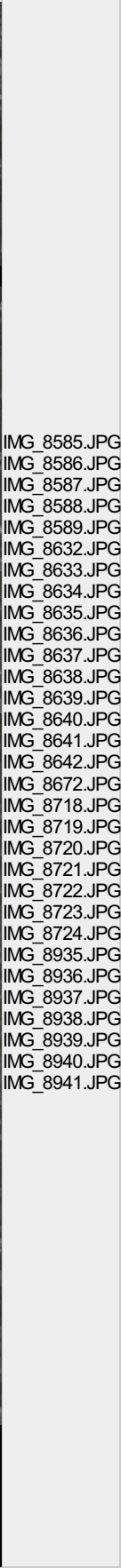
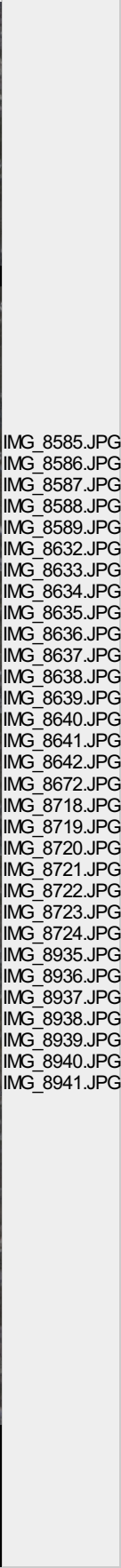
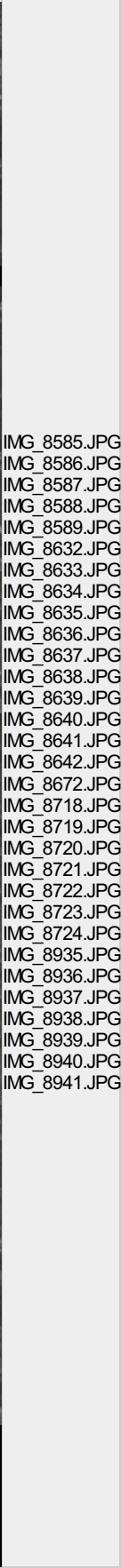
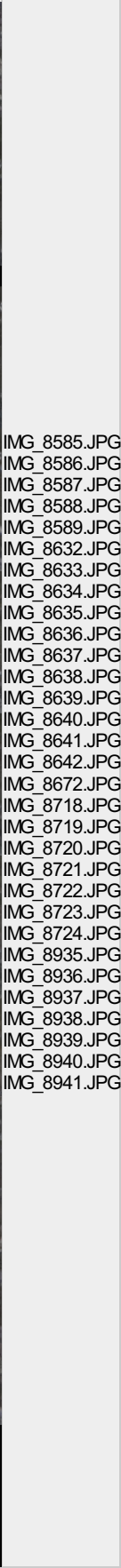
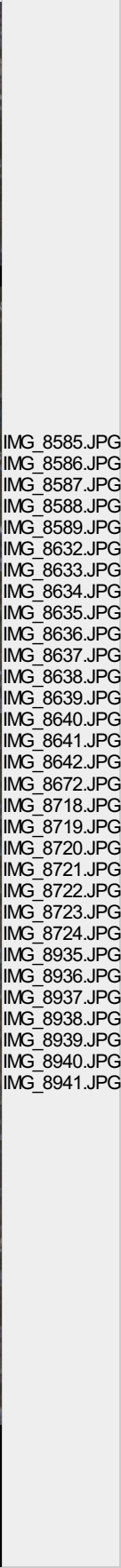
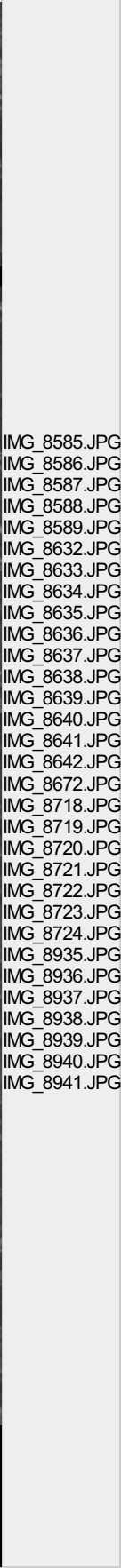
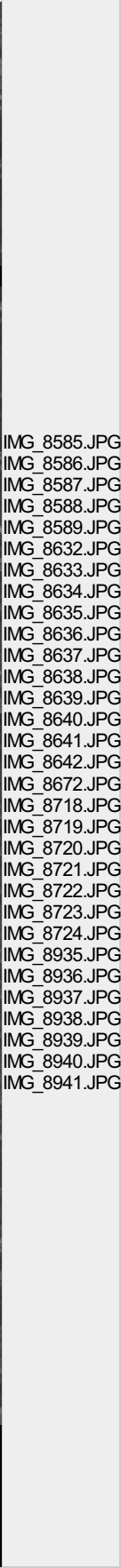
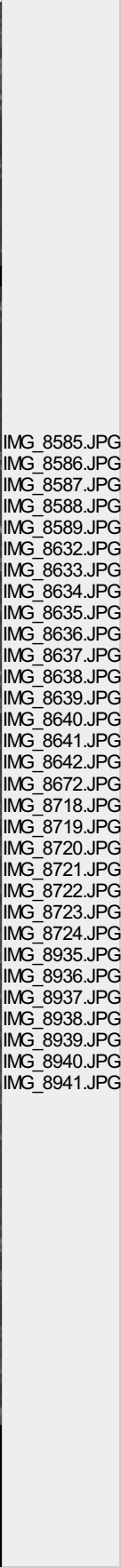
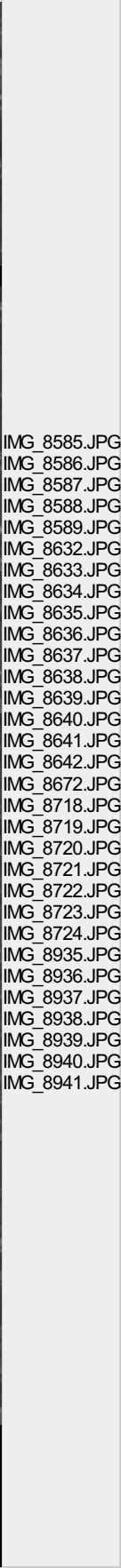
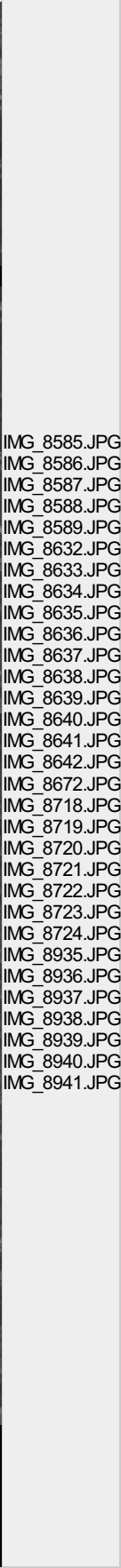
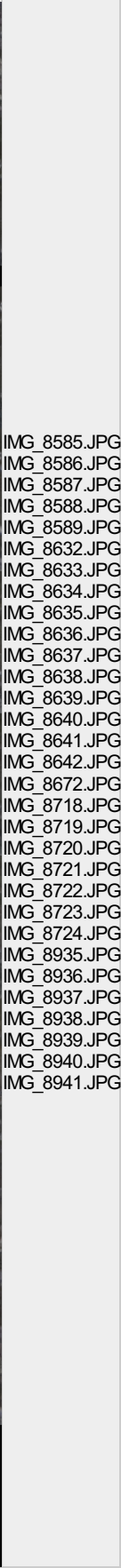
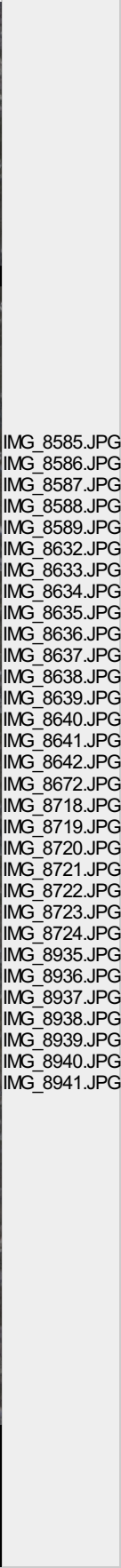
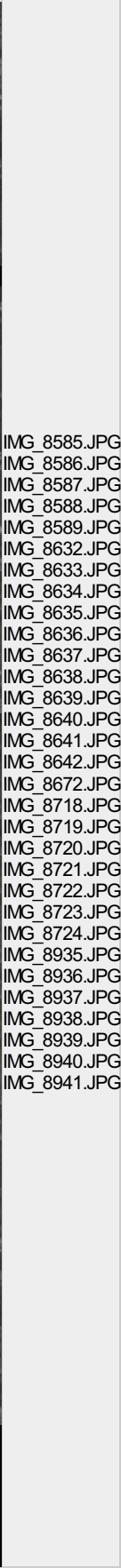
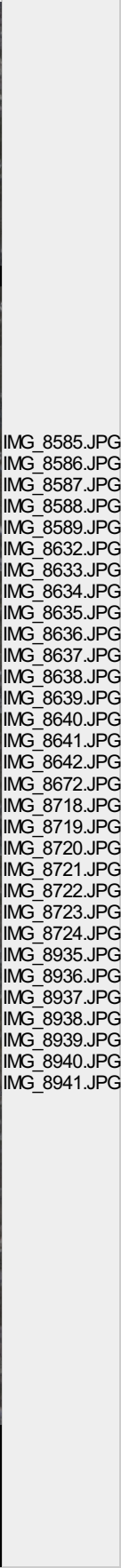
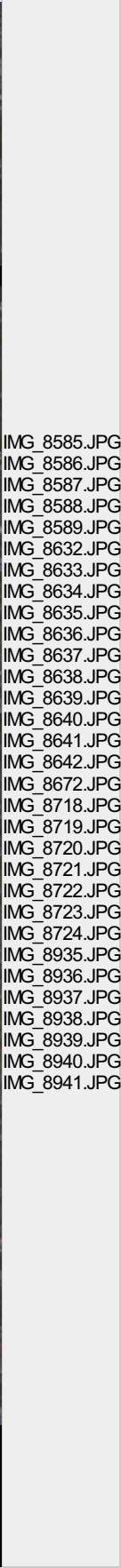
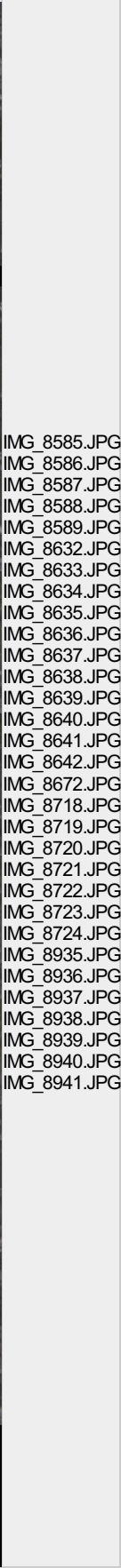
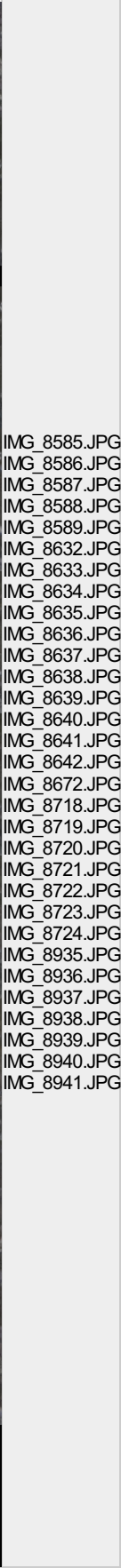
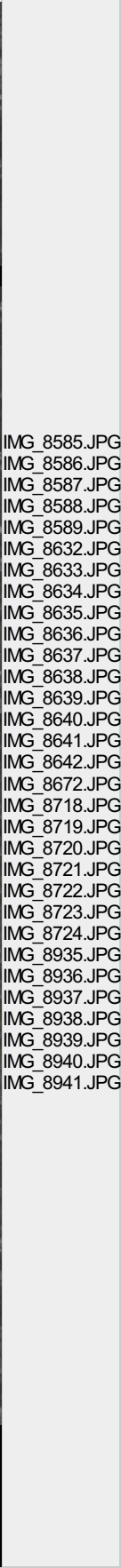
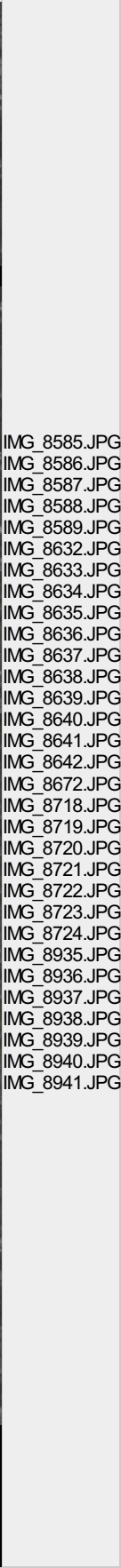
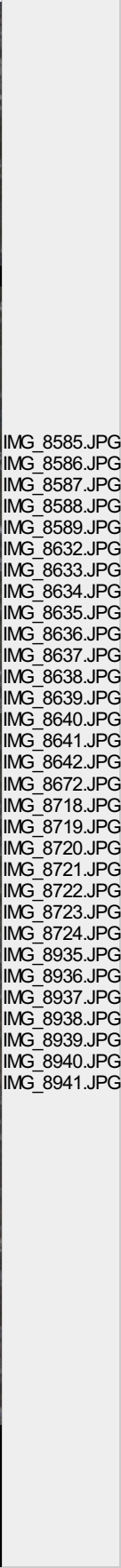
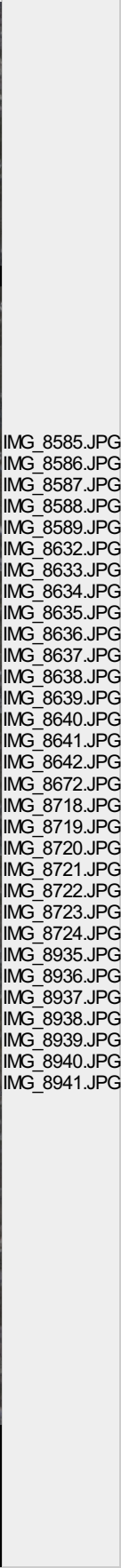
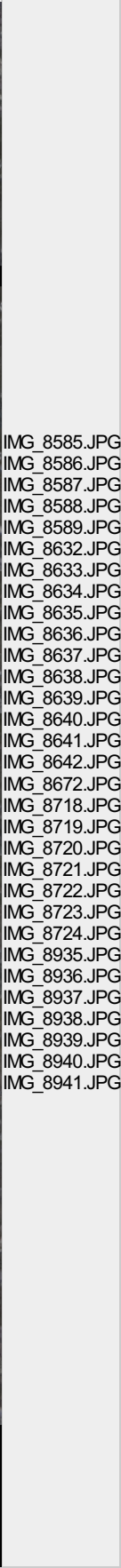
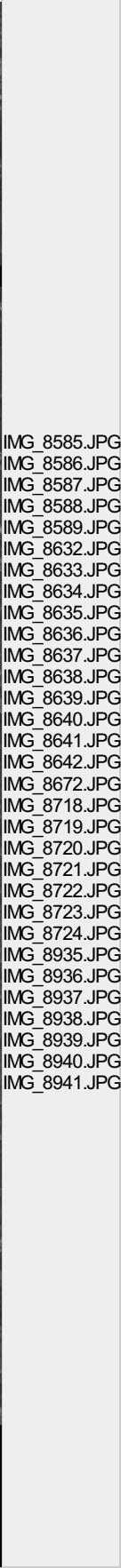
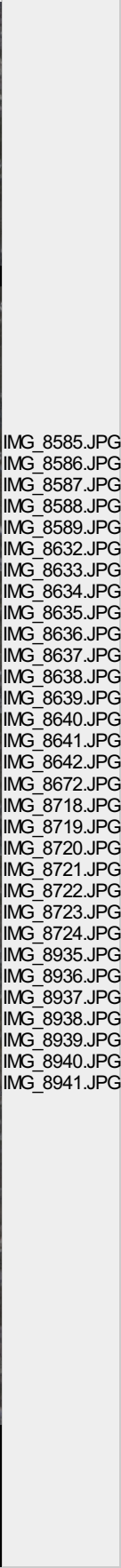
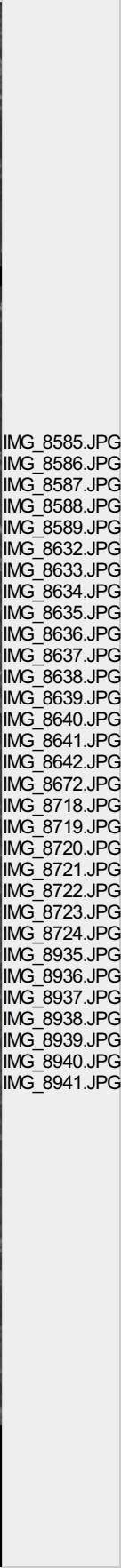
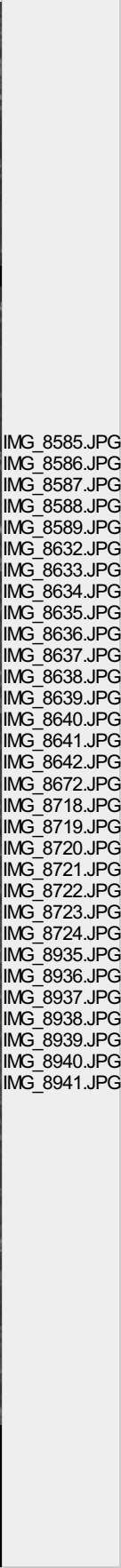
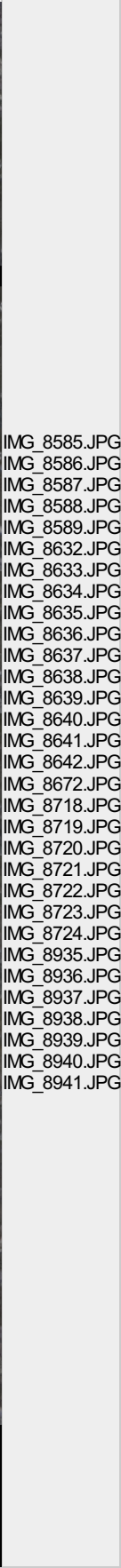
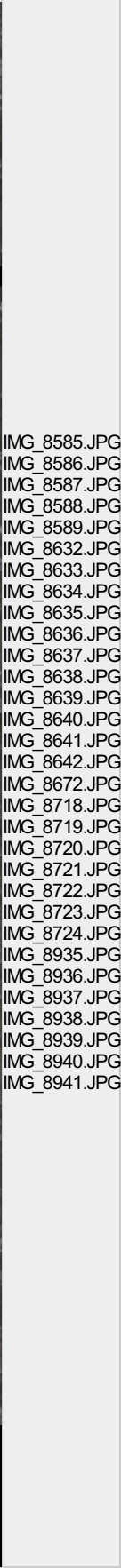
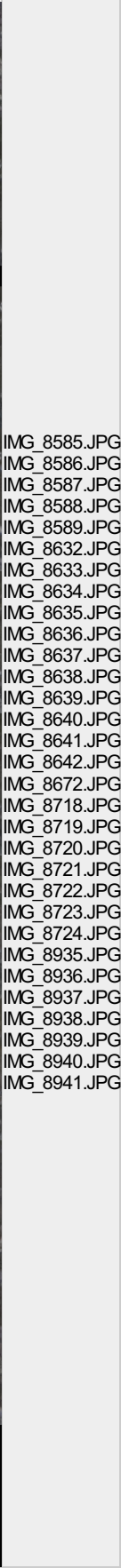
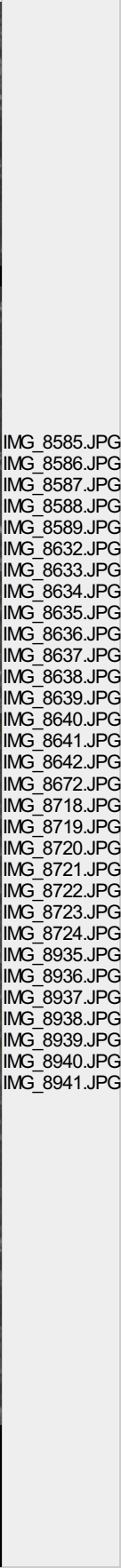
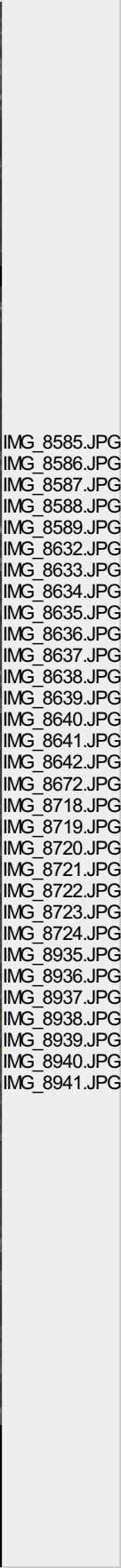
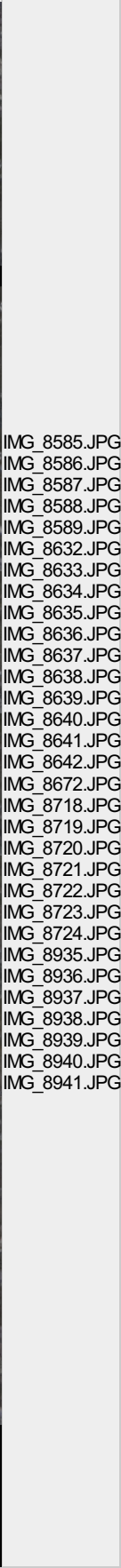
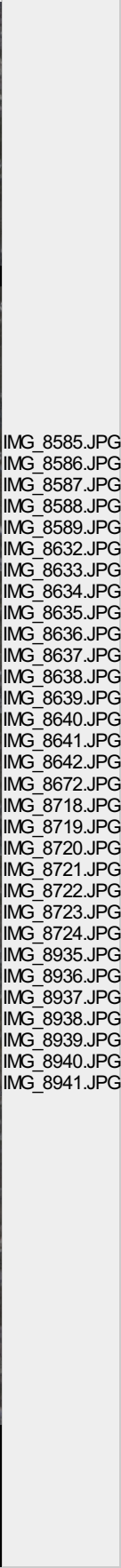
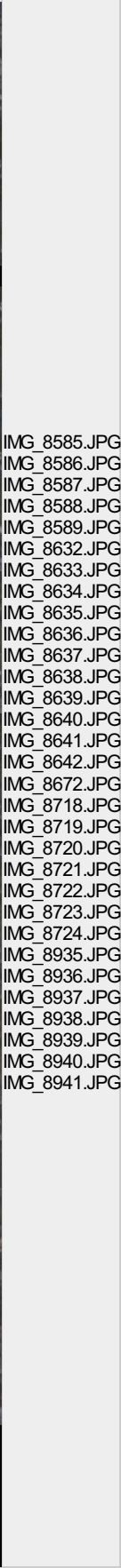
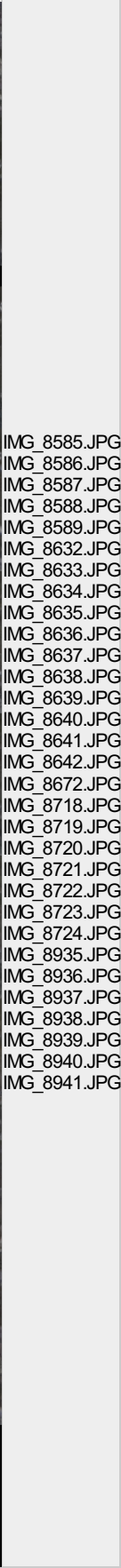
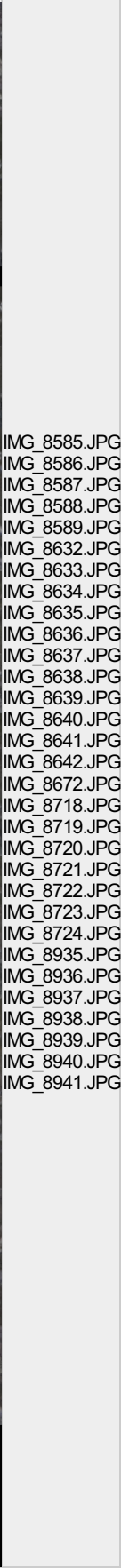
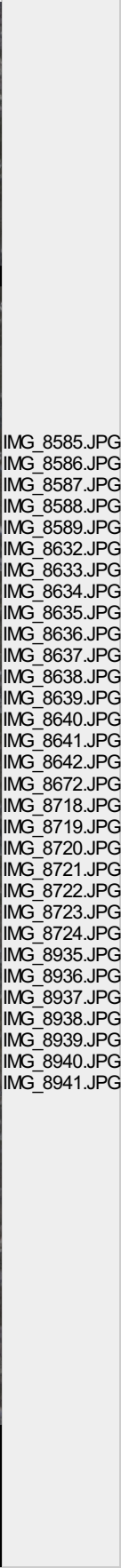
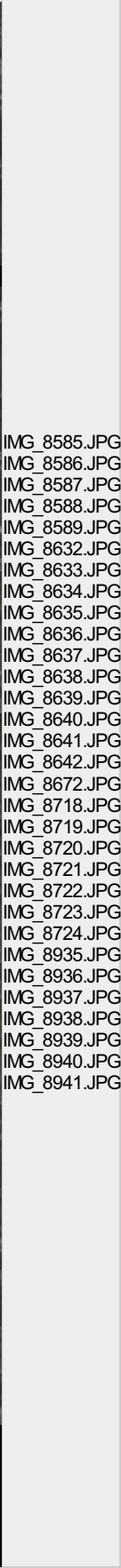
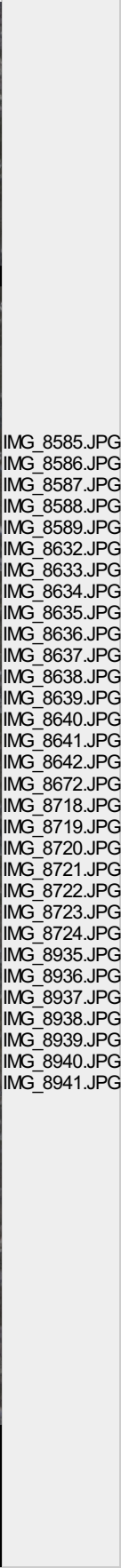
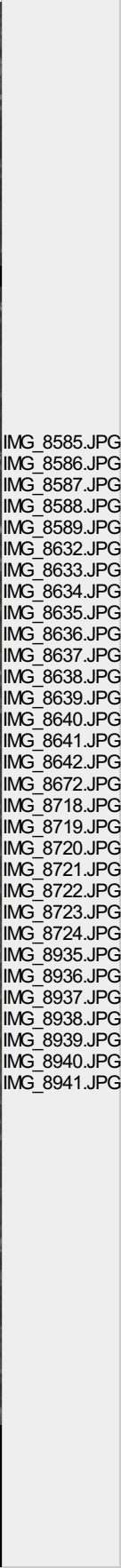
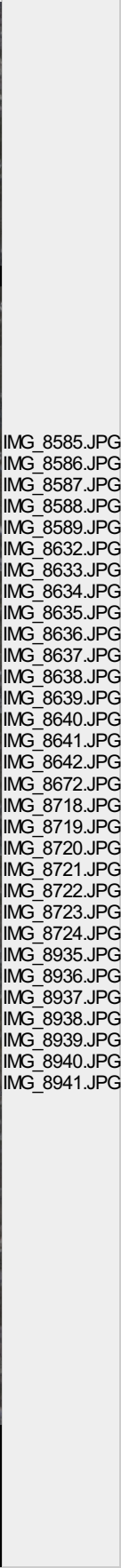
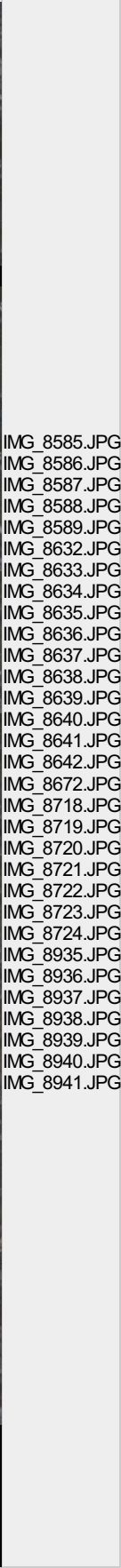
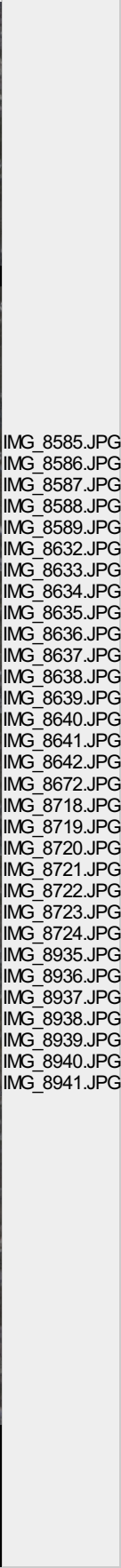
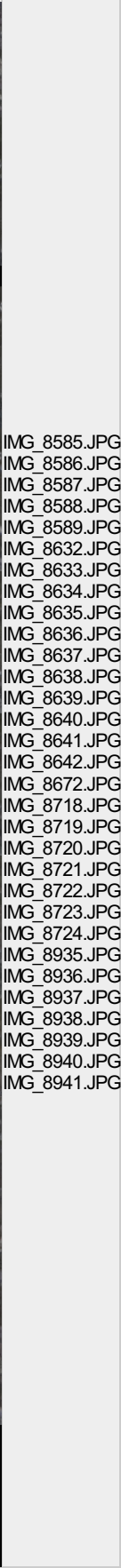
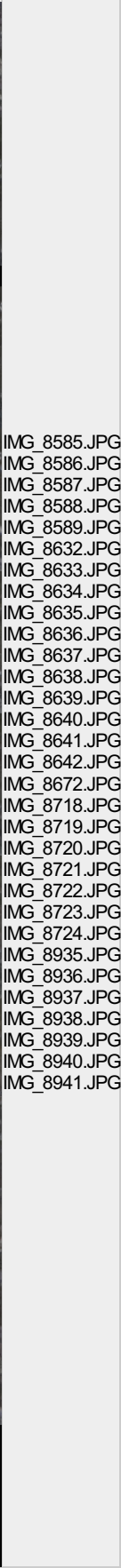
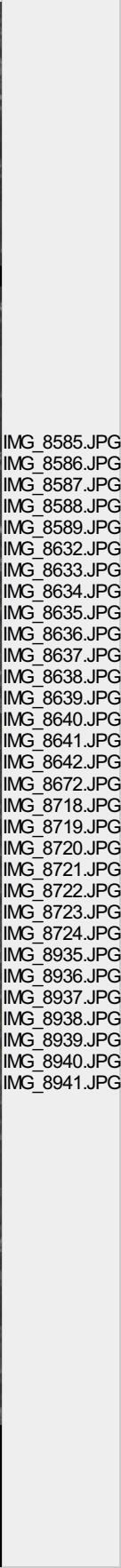
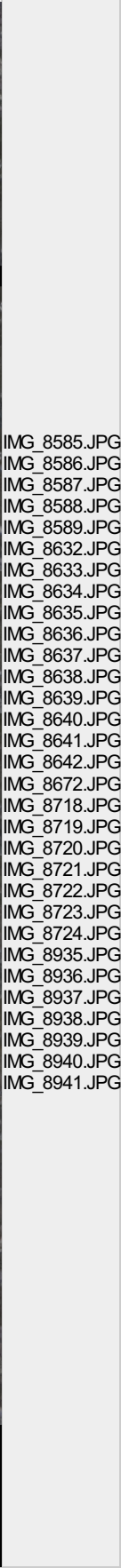
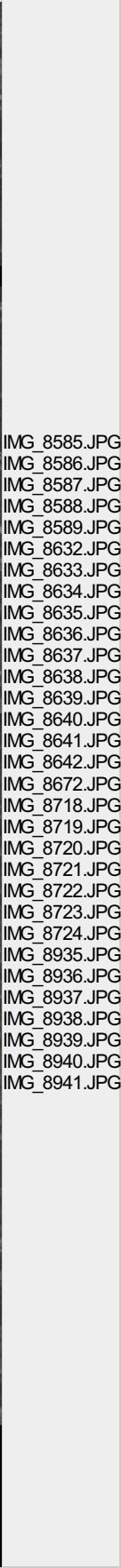
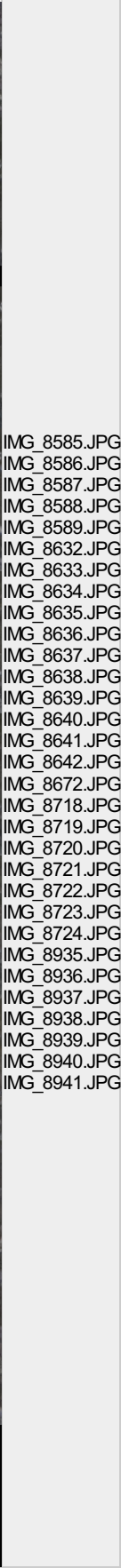
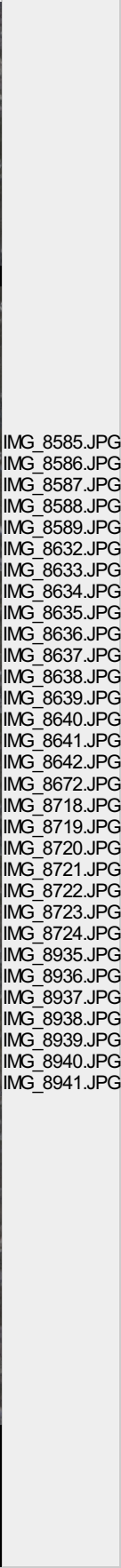
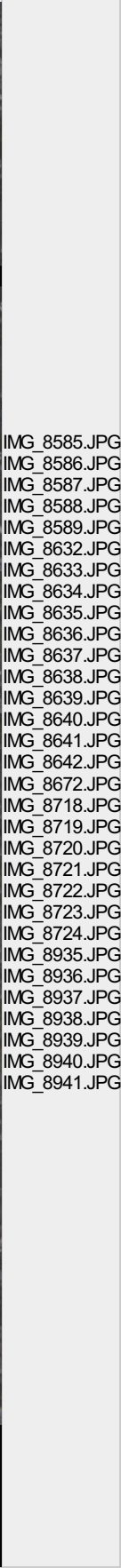
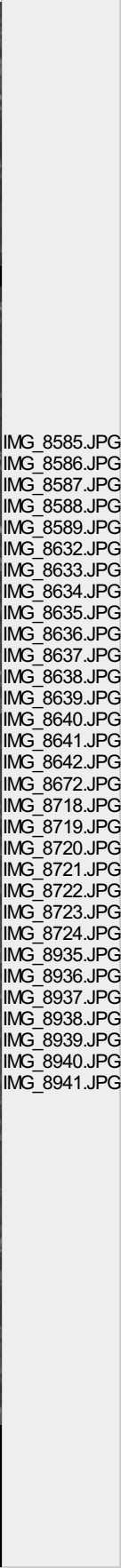
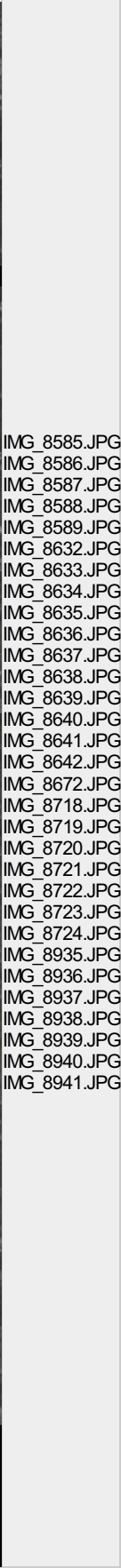
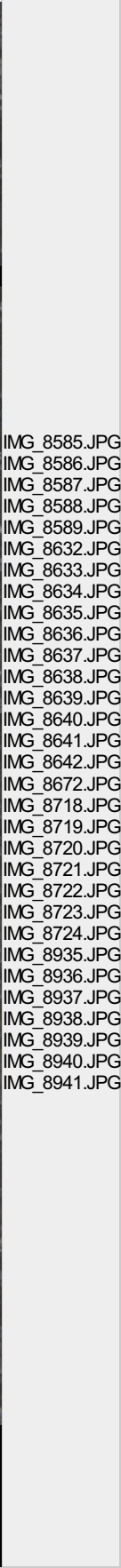
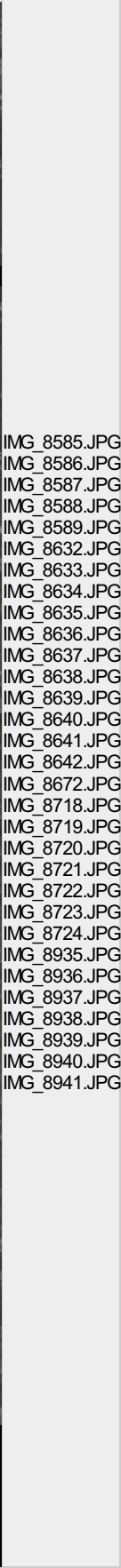
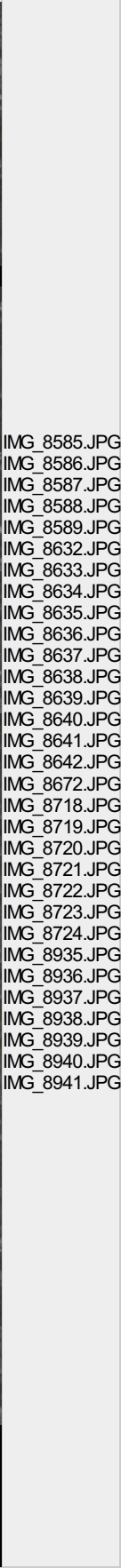
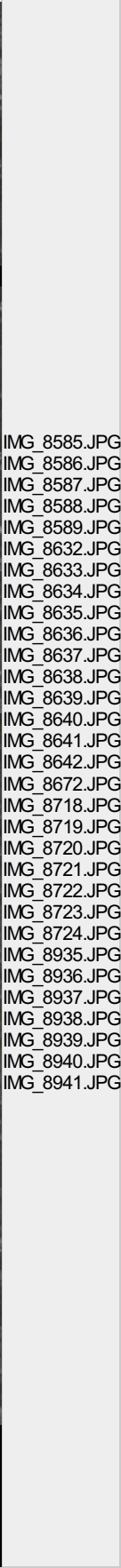
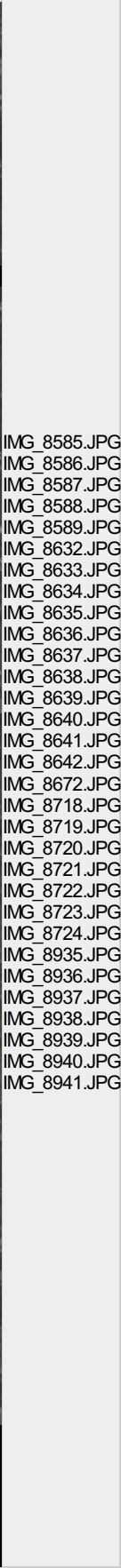
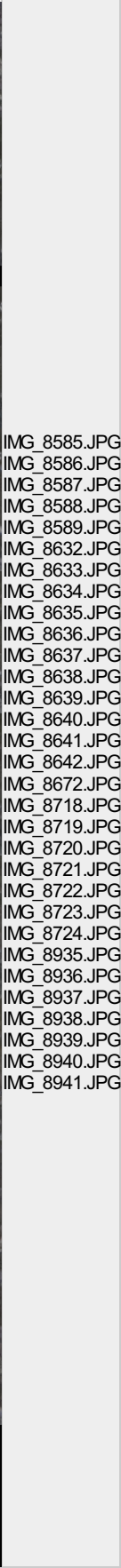
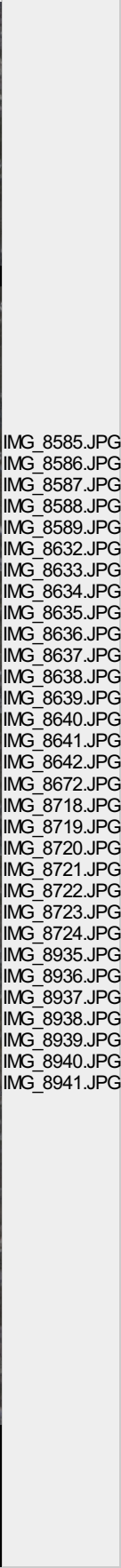
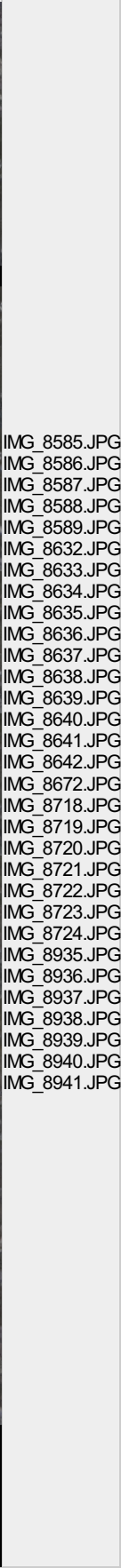
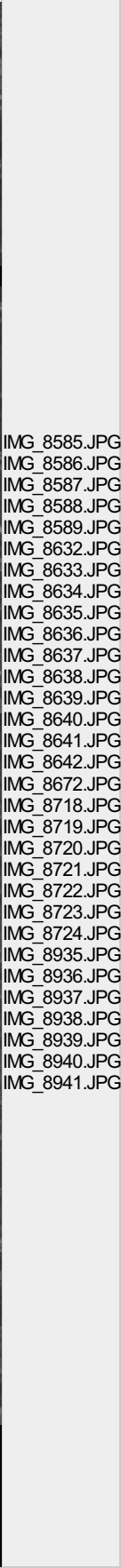
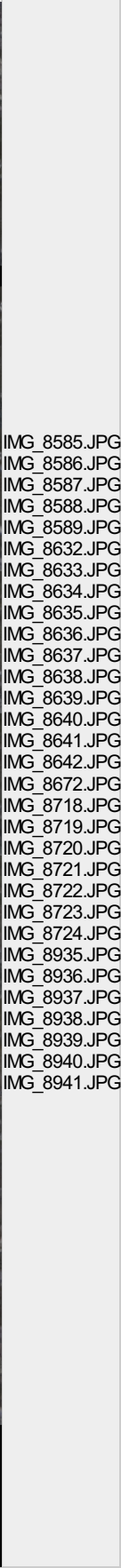
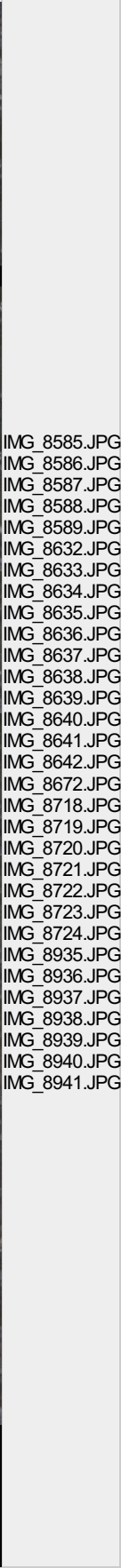
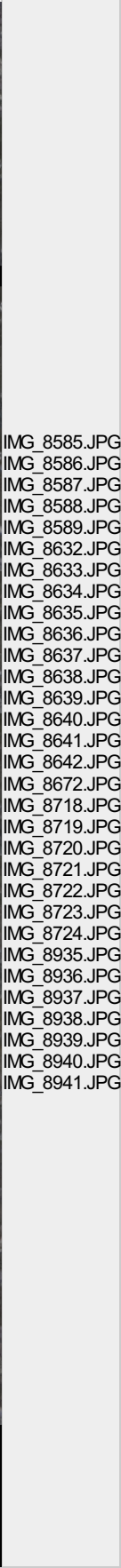
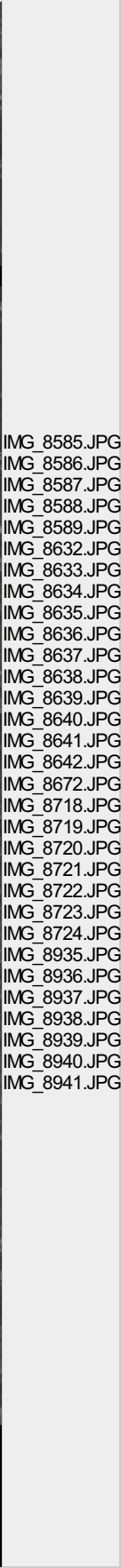
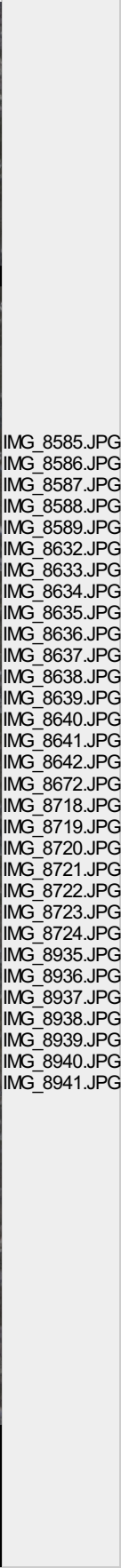
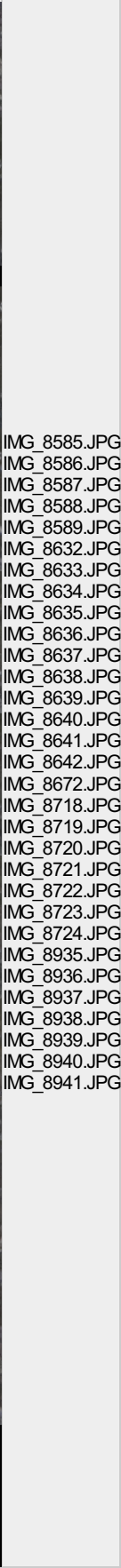
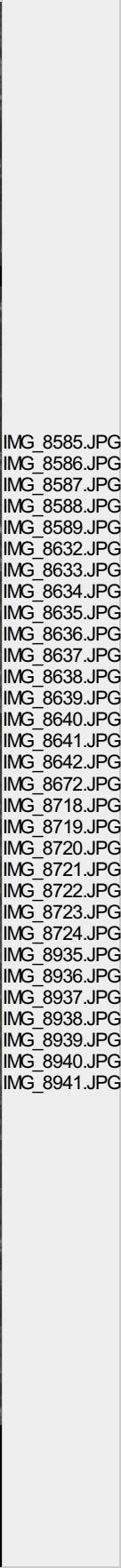
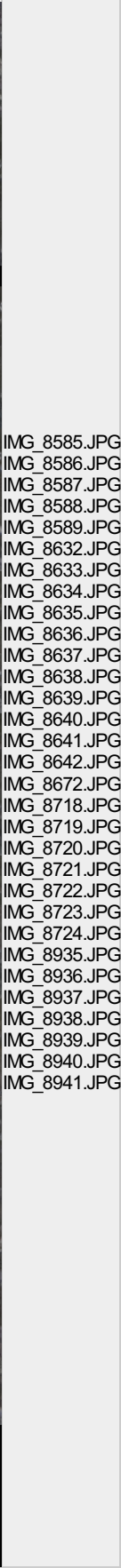
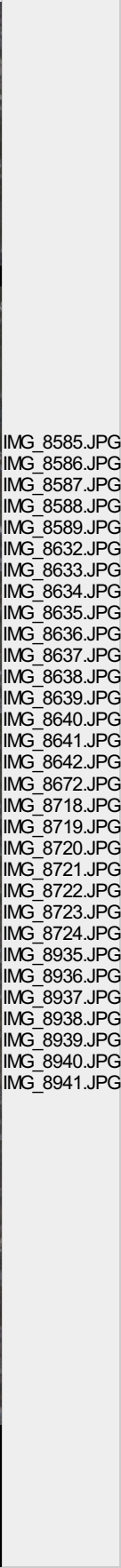
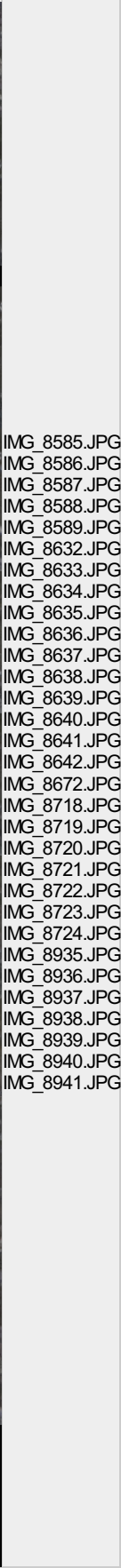
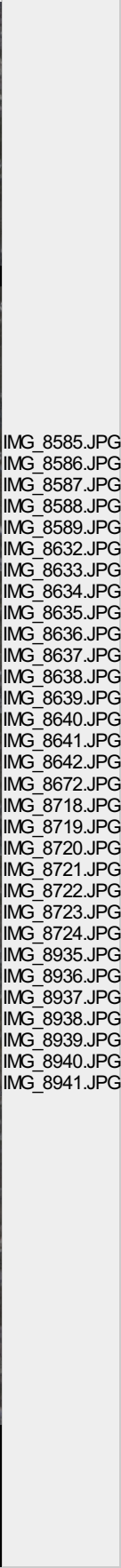
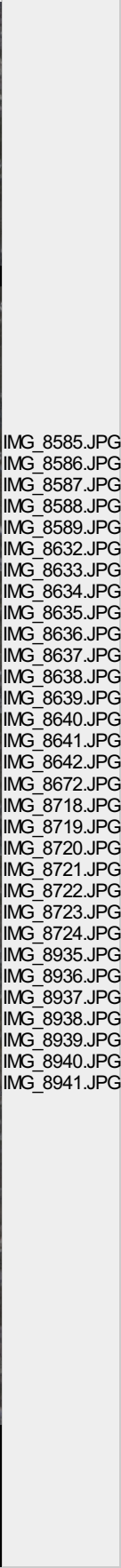
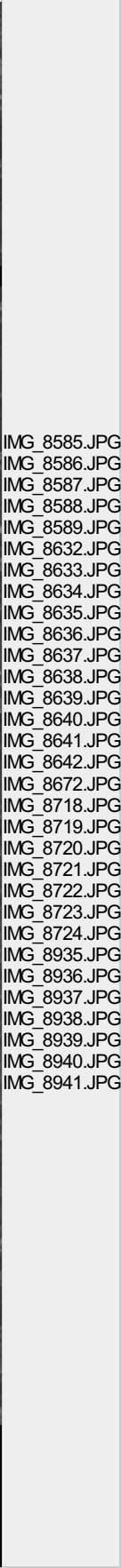
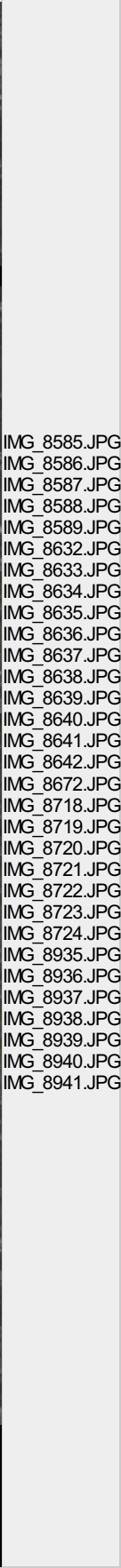
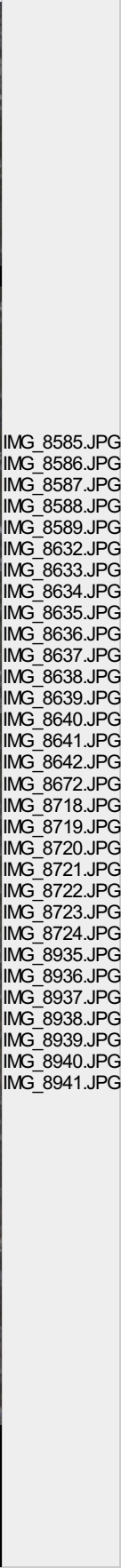


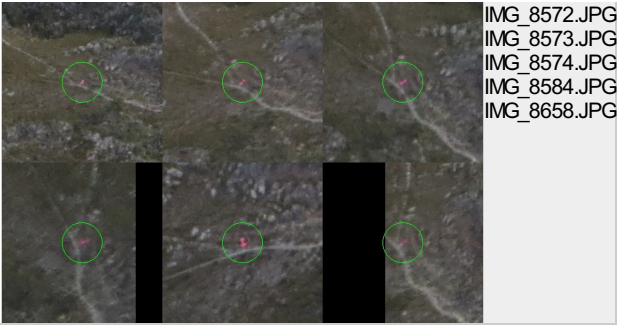
Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	53.11	5.51	37.12
[-2.00, 2.00]	69.98	15.45	82.77
[-3.00, 3.00]	78.15	24.87	88.63
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

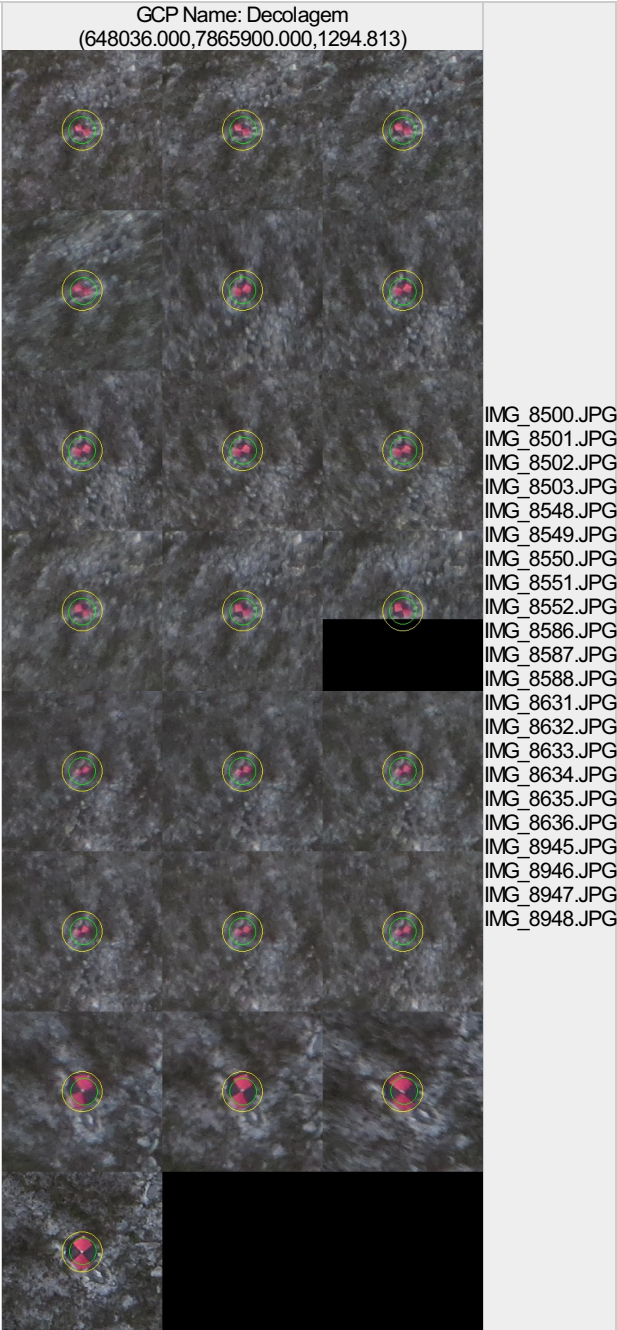
Georeference Verification



GCP Name: Trilha (647893.000,7865920.000,1280.966)			
			
GCP Trilha was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			

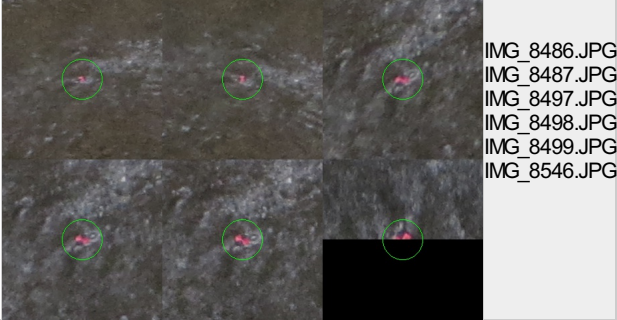


IMG_8572.JPG
IMG_8573.JPG
IMG_8574.JPG
IMG_8584.JPG
IMG_8658.JPG



IMG_8500.JPG
IMG_8501.JPG
IMG_8502.JPG
IMG_8503.JPG
IMG_8548.JPG
IMG_8549.JPG
IMG_8550.JPG
IMG_8551.JPG
IMG_8552.JPG
IMG_8586.JPG
IMG_8587.JPG
IMG_8588.JPG
IMG_8631.JPG
IMG_8632.JPG
IMG_8633.JPG
IMG_8634.JPG
IMG_8635.JPG
IMG_8636.JPG
IMG_8945.JPG
IMG_8946.JPG
IMG_8947.JPG
IMG_8948.JPG

GCP Decolagem was not marked on the following images (only up to 6 images shown). If the circle is too far away from the initial GCP position, also measure the GCP in these images to improve the accuracy.



IMG_8486.JPG
IMG_8487.JPG
IMG_8497.JPG
IMG_8498.JPG
IMG_8499.JPG
IMG_8546.JPG



Figure 7: Images in which GCPs have been marked (yellow circle) and in which their computed 3D points have been projected (green circle). A green circle outside of the yellow circle indicates either an accuracy issue or a GCP issue.

Processing Options



Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-4810MQ CPU @ 2.80GHz RAM: 16GB GPU: Intel(R) HD Graphics 4600 (Driver: 10.18.10.3431), NVIDIA GeForce GTX 880M (Driver: 9.18.13.3266), RDPDD Chained DD (Driver: unknown), RDP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Professional, 64-bit
Camera Model Name	CanonPowerShotSX260HS_4.5_4000x3000 (RGB)
Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS84 / UTM zone 23S
Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 23S

Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard, Internal Parameters Optimization: All, External Parameters Optimization: All, Rematch: no

Point Cloud Densification details



Processing Options



Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	4
3D Textured Mesh Generation	yes, Maximum Number of Triangles: 1000000, Texture Size: 8192x8192
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Densification Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Advanced: Point Cloud Classification (beta)	yes, Minimum Object Length [m]: 0.1, Maximum Object Length [m]: 400, Minimum Object Height [m]: 0.1
Time for Point Cloud Densification	08h:44m:53s
Time for Point Cloud Classification	02h:14m:45s
Time for 3D Textured Mesh Generation	24m:02s

Results



Number of Processed Clusters	5
Number of Generated Tiles	17
Number of 3D Densified Points	145804324
Average Density (per m ³)	17.39

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (6.69 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes, Surface Smoothing: yes, Sharp
DSM Generation	yes, Method: Inverse Distance Weighting, Merge Tiles: yes
Time for DSM Generation	02h:10m:25s
Time for Orthomosaic Generation	42m:30s