



Avaliação do rigor posicional de UAV com GNSS RTK

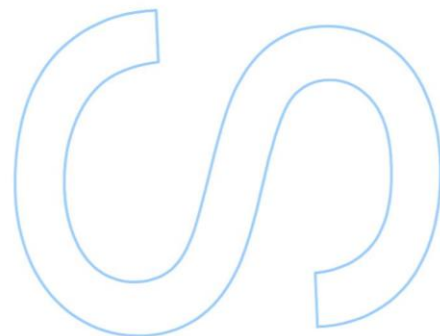
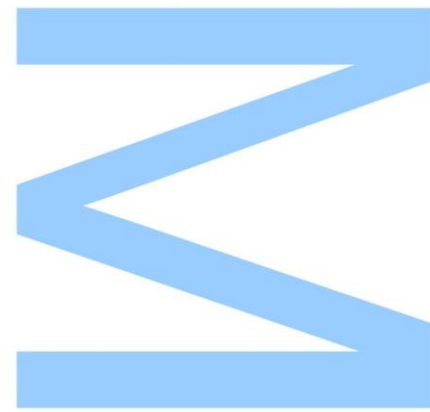
Yuri Cândido Andrade

Mestrado em Detecção Remota

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2021/2022

Orientador

José Alberto Álvares Pereira Gonçalves, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências
Da Universidade do Porto

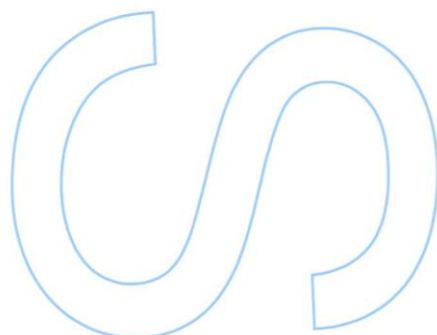
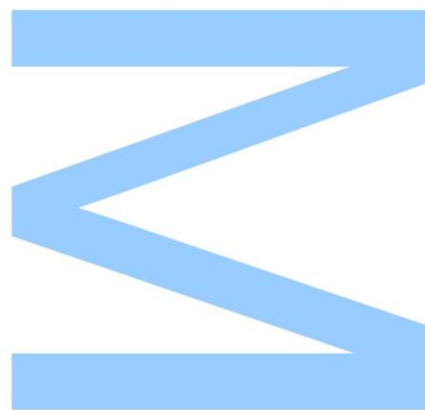




Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Declaração de Honra

Eu, Yuri Cândido Andrade, inscrito no Mestrado em Detecção Remota da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto declaro, nos termos do disposto na alínea a) do artigo 14.º do Código Ético de Conduta Académica da U.Porto, que o conteúdo da presente dissertação reflete as perspetivas, o trabalho de investigação e as minhas interpretações no momento da sua entrega.

Ao entregar esta dissertação, declaro, ainda, que a mesma é resultado do meu próprio trabalho de investigação e contém contributos que não foram utilizados previamente noutros trabalhos apresentados a esta ou outra instituição.

Mais declaro que todas as referências a outros autores respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, encontrando-se devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências bibliográficas. Não são divulgados na presente dissertação quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor.

Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

Yuri Cândido Andrade

Porto, 22/12/2022

“All we have to decide is what to do with the time that is given us”

Gandalf the Grey

Agradecimentos

Bem, aqui vem a parte em que realmente sou livre para escrever, sem muitas regras ou formatações. Então vamos lá...

Em primeiro lugar, sou imensamente agradecido à Deus, porque diante de todos os caminhos que a vida poderia me levar, Ele me conduziu até aqui, até este momento exato em que estou digitando estas palavras, extasiado, muito feliz por mais este ciclo que se encerra.

Na sequência, quero agradecer aos meus pais, Mariângela e Vladimir, que me deram apoio moral e também financeiro para ser capaz de concluir este mestrado com grande louvor. Também à minha irmã, Ivna, que sempre esteve presente comigo, mesmo de longe. Obrigado a vocês, minha família, por tudo.

Quero aproveitar este pequeno espaço de texto que tenho para agradecer ainda à minha noiva, Elizângela, que esteve e está sempre me apoiando nas decisões que eu tomo e não me deixou desistir desta caminhada (e nós sabemos como isso foi difícil). Obrigado, meu amor, você foi parte essencial para esta conquista.

Ao meu professor e orientador deste trabalho, José Alberto Gonçalves, por todo o tempo e paciência dedicados a me auxiliar na escolha de um tema interessante e por dar todo o suporte para que esta pesquisa fosse concluída com êxito.

Amigos, amigos... sem eles o que somos, afinal? My brother, Ian, o famoso Ianzera ou Baiano safado, pros mais chegados. Obrigado pelas risadas e os momentos de estudos juntos, porque sem a sua parceria, teria sido bem mais complicada e pesada esta trajetória. No final das contas, mestre somos (ou quase), não é mesmo? Ao Matchola, Anca e Lucão pelo grande companheirismo durante o primeiro ano deste curso, na saudosa casa da Arnaldo Gama (jamais será esquecida).

Inclusive, na mesma linha de pensamento deste meu querido amigo Ian, também agradeço a mim mesmo, pois sei melhor do que ninguém o que este mestrado em Portugal me custou... tempo, dinheiro, preocupação, amizades, entre outros. Mas, mesmo diante de todas as intempéries da vida, cá ainda estou, de pé, firme, mais aprimorado do que nunca e o mais importante... agradecido e sem nenhum arrependimento!

Aos não citados neste texto, cada um sabe a importância que teve em todo este processo. Obrigado!

RESUMO

Por defeito, a maioria dos *softwares* de processamento de imagens de levantamentos aerofotogramétricos está configurada para autocalibrar os parâmetros de orientação interior (POIs) das câmaras usadas, de forma a reduzir o Erro Quadrático Médio (RMSE) nas coordenadas dos produtos gerados. Por meio da fixação dos POIs e de uma série de levantamentos aéreos, este trabalho procurou identificar o impacto que esta autocalibração causa na acurácia posicional dos modelos digitais de elevação (DEMs) produzidos, com foco na altimetria. Para além disto, evidenciou-se que os POIs informados pela fabricante não são os mais fiáveis que se pode adotar. Para isso, utilizou-se o UAV modelo Phantom 4 RTK e o software de processamento de imagens, Metashape, tanto com a presença como com a ausência de pontos de controlo rastreados com GNSS geodésico, pelo método RTK. As áreas de estudo escolhidas foram duas, sendo a primeira usada para o cálculo de novos POIs, enquanto a segunda serviu como validadora da qualidade destes novos parâmetros. Os resultados encontrados foram a confirmação da baixa precisão nos POIs originais informados pela fabricante, que causaram degradação da acurácia posicional dos produtos quando foram fixados, em comparação com os POIs ajustados pelo software. Ademais, os novos parâmetros de orientação interior da câmara, calculados pelo *software* na primeira área, revelaram-se como sendo muito promissores quando fixados no processamento das imagens da segunda área escolhida. Em suma, foi possível definir um fluxo de trabalho aerofotogramétrico mais eficiente e otimizado, tanto na etapa de campo quanto no processamento dos dados, de forma a obter um elevado rigor posicional nas coordenadas dos produtos gerados.

Palavras-chave: POIs, RMSE, DEMs, Phantom 4, RTK, acurácia.

ABSTRACT

By default, most image processing software for aerophotogrammetric surveys is configured to auto-calibrate the intrinsic camera parameters (ICPs) of the cameras used, to reduce the Root-Mean-Square Error (RMSE) in the coordinates of the generated products. Through the fixation of ICPs and a series of aerial surveys, this work sought to identify the impact that this self-calibration causes on the positional accuracy of the digital elevation models (DEMs) produced, with a focus on altimetry. Furthermore, it became clear that the ICPs informed by the manufacturer are not the most reliable that can be adopted. For this, the Phantom 4 RTK UAV model and the image processing software Metashape were used, both with the presence and absence of control points tracked with a precision GNSS, by the RTK method. The study areas chosen were two, the first being used for the calculation of new ICPs, while the second served as a validator of the quality of these new parameters. The results found were confirmation of the low precision in the original ICPs informed by the manufacturer, which caused degradation of the positional accuracy of the products when they were fixed, compared to the ICPs adjusted by the software. Furthermore, the new intrinsic camera parameters, calculated by the software in the first area, proved to be very promising when fixed in the processing of the images of the second chosen area. In short, it was possible to define a more efficient and optimized aerophotogrammetric workflow, both in the field stage and in the data processing, to obtain high positional accuracy in the coordinates of the generated products.

Keywords: ICPs, RMSE, DEMs, Phantom 4, RTK, accuracy.

Conteúdo

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivações e Objetivos	3
1.2 Estrutura	3
2 Fundamentação teórica	5
2.1 <i>Structure-from-Motion</i>	5
2.2 Aerotriangulação	5
2.3 Orientação interior da câmara	6
3 Materiais e métodos	9
3.1 Áreas de estudo	9
3.2 Metodologia	11
4 Resultados e discussões	15
4.1 Observatório astronómico	15
4.2 Santa Maria da Feira	17
5 Conclusão	19
Anexo 1	23

Lista de Figuras

1	Structure-from-Motion (SfM). A técnica SfM exige múltiplas fotografias sobrepostas como entrada (<i>input</i>) para algoritmos de extração de feições e reconstrução 3D.	5
2	Distância focal gaussiana equivalente (f) em representação conjunta com o centro perspetivo da câmara (CP). (Figura adaptada de [27])	7
3	Vista lateral da distorção radial simétrica (esquerda) e seus possíveis efeitos na imagem capturada (direita). (Figura adaptada de [27])	8
4	Vista superior da distorção tangencial (esquerda) e seus possíveis efeitos na imagem capturada (direita). (Figura adaptada de [27])	8
5	Área de Estudo - Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros.	10
6	Área de Estudo - Secção da cidade de Santa Maria da Feira, no Distrito de Aveiro. . .	10
7	Pontos de verificação (branco) e pontos de controlo (vermelho) usados no observatório.	11
8	Pontos de verificação distribuídos de maneira homogênea.	12
9	Modelo digital de elevação - Observatório.	13
10	Modelo digital de elevação - Santa Maria da Feira.	14
11	Distorção radial (em pixels) para os parâmetros originais da câmara.	16
12	Distorção descentrada (em pixels) para os parâmetros originais da câmara.	16
13	Distorção radial (em pixels) para os parâmetros da câmara estimados.	16
14	Distorção descentrada (em pixels) para os parâmetros da câmara estimados.	17

Lista de Tabelas

1	Resumo dos resultados obtidos nos quatro cenários do observatório.	15
2	Resumo dos resultados obtidos nos quatro cenários em Santa Maria da Feira.	17
3	Diferença entre distância focal original e ajustada.	18

Lista de siglas e acrónimos

SAR	<i>Synthetic-Aperture Radar</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft Systems</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
ANAC	Autoridade Nacional da Aviação Civil
MTOM	<i>Maximum Take-Off Mass</i>
SfM	<i>Structure-from-Motion</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
POI	Parâmetro de Orientação Interior
POE	Parâmetro de Orientação Exterior
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
CP	Centro Perspetivo
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
RMSE	<i>Root-Mean-Square Error</i>

1 Introdução

Quando se trata de fenômenos e ocorrências geoespaciais, a detecção remota é uma das ciências mais utilizadas como base para geração de dados que podem ser analisados e trabalhados para produzir informação geográfica. Estes dados podem ter sua origem de várias formas, por exemplo: imagens de satélite, radar, levantamentos aerofotogramétricos, batimétricos e interferometria SAR. Por meio destes produtos é possível a realização de diversos estudos e pesquisas sobre as respostas espectrais de porções do planeta, classificação de uso e ocupação do solo, identificação e mensuração de áreas, perímetros e volumes, cadastramento de estruturas, modelos hidrográficos, dentre outros.

Sistemas de aeronaves não tripuladas (UAS) de nível comercial, em particular pequenas aeronaves não tripuladas (UAVs) - definidas pela Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC) de Portugal como tendo peso máximo de decolagem (MTOM) inferior a 25 kg [1] - em conjunto com câmaras digitais tornaram-se uma ferramenta comum na produção de informações geográficas detalhadas na última década [2]. Paralelamente ao surgimento da tecnologia UAV, o fluxo de processamento fotogramétrico *Structure-from-Motion* (SfM) tornou-se uma abordagem usual para fornecer alta resolução espaço-temporal em modelos digitais de elevação (DEMs) a partir de imagens de UAV [3].

Tal abordagem tem sido amplamente adotada em *softwares* de nível comercial, por exemplo o Metashape da desenvolvedora Agisoft, que oferece rotinas de processamento fotogramétrico automatizadas e projetadas para o uso de pessoas não especialistas. Portanto, torna-se crucial uma compreensão completa dos erros fotogramétricos e das incertezas associadas ao processo SfM, especialmente quando sistemas UAV emergentes são utilizados para aplicações que podem exigir acurácia posicional 3D de nível centimétrico ou superior.

Existe uma variedade de plataformas de nível comercial UAV e as suas usabilidades dependem da natureza da aplicação e das condições ambientais. Enquanto um UAV de asa fixa é capaz de voar de maneira eficiente sobre grandes áreas, os UAVs de asa rotativa são mais fáceis de manobrar, descolar e aterrar com precisão, especialmente quando operados em ambientes desafiadores como sobre corpos d'água, florestas e encostas íngremes e acidentadas. Estudos recentes indicaram que, desde 2010, houve uma redução significativa no valor de compra de um UAV de asa rotativa equipado com sensores de nível comercial [4][5]. A partir do ano 2017, o UAV da série DJI Phantom de asa rotativa [6] tornou-se cada vez mais atraente em uma ampla gama de aplicações de pesquisa, tais como: morfologia de recife de corais sobre águas rasas [7], mapeamento e monitorização de estruturas geomorfológicas relacionadas a geleiras [8], monitorização da altura de culturas [9] e modelagem 3D de patrimônios culturais [10].

Os estudos de caso mencionados anteriormente demonstram um crescente interesse na utilização dos UAVs da série DJI Phantom para operações de fotogrametria, uma vez que oferecem uma boa relação entre custo, qualidade do sensor, funcionalidades e portabilidade em comparação com outros UAVs mais caros de asa fixa ou o laser *scanner* terrestre (TLS) [5][8]. Além disso, melhorias significativas nos instrumentos do Phantom 4 Pro são relatadas em comparação com seu modelo anterior [10].

De maneira simplificada, o tempo de um mapeamento usando UAVs está relacionado ao desempenho do equipamento nas missões de voo para aquisição de dados somado à implantação, rastreamento

e recuperação dos pontos de controlo (GCPs). De facto, os GCPs geralmente consistem em alvos úteis (e geralmente necessários) para uma georreferenciação acurada dos modelos gerados, embora as operações relacionadas aos GCPs durante o trabalho de campo sejam normalmente demoradas. O geotagging de imagens aéreas com dados de GNSS de navegação - sistema que usualmente vem por defeito nos UAVs - economiza o tempo da identificação de alvos nas imagens, pois o usuário pode gerar um modelo georreferenciado aproximado antes de qualquer operação adicional relacionada aos GCPs. No entanto, o GNSS de navegação possui limitações que impedem a reconstrução de modelos fotogramétricos com georreferenciação direta devido à baixa precisão dos parâmetros de orientação externa. Normalmente, as posições das câmaras têm uma incerteza da ordem de metros nas três direções: Este (E), Norte (N) e Altitude (Z).

Vários estudos recentes se concentraram na eliminação do trabalho intensivo e dispendioso de materializar pontos de controlo (GCPs), por exemplo com o uso de plataformas UAV embarcadas com tecnologia GNSS *real time kinematic* (RTK) [4][11]. Seguindo essa tendência, em outubro de 2018 a DJI lançou o UAV Phantom 4 RTK que fornece um link direto com uma estação base GNSS fabricada pela DJI, além de registar as observações brutas da trajetória do GNSS para um pós-processamento; dois recursos que não foram incluídos em nenhum modelo anterior do Phantom. A adição destes elementos auxiliou ainda mais a produção de informação geográfica confiável e menos dispendiosa por meio da fotogrametria.

Quando um UAV é equipado com um recetor GNSS multifrequência, o trajeto percorrido durante o voo é determinado a posteriori, geralmente com acurácia centimétrica, não sendo necessário o uso de um grande conjunto de GCPs para a georreferenciação dos produtos gerados. Isso causa uma redução considerável no tempo necessário em campo. Além disso, a aquisição de imagens pode gerar não apenas DEMs de alta resolução, mas também ortomosaicos com resolução espacial de alguns centímetros. A recente disponibilidade de UAVs embarcados com um recetor GNSS multifrequência e multiconstelação [12] torna a georreferenciação direta acessível a quase qualquer tipo de usuário, a um custo cada vez mais baixo [13]. Estas aeronaves podem registar sua trajetória de voo por meio das observações GNSS e realizar o geotag das imagens com coordenadas precisas ao nível do centímetro. As estratégias para usar esta tecnologia são as mesmas dos recetores GNSS geodésicos tradicionais sendo o próprio UAV, neste caso, o rover.

Apesar do aprimoramento da acurácia posicional apoiado pelo uso de um GNSS multifrequência embarcado no UAV, há um outro problema que impacta consideravelmente a exatidão do posicionamento dos modelos gerados: a incerteza dos parâmetros de orientação interior das câmaras de nível comercial.

Para obter informações posicionais precisas a partir de imagens, é necessário estabelecer os parâmetros de orientação interior (POIs) e exterior (POEs) da câmara. Os POIs, que abrangem as características internas do sensor como distância focal, coordenadas do ponto principal e distorções da lente, são estabelecidos por meio de um procedimento de calibração da câmara. Já os POEs, que definem a posição e a orientação da câmara no momento da captura da imagem, podem ser estabelecidos usando GCPs por meio de um processo de ajustamento de observações ou por informações da trajetória fornecidas por um GNSS e um *inertial navigation system* (INS) a bordo do UAV. A primeira estratégia citada é

conhecida como georreferenciação indireta, enquanto a última é referida como georreferenciação direta. No caso de georreferenciação indireta, os erros derivados dos POIs da câmara podem ser absorvidos pelos POEs estimados no processo de ajustamento. No entanto, na georreferenciação direta, POIs imprecisos afetariam significativamente a acurácia das coordenadas [14][15].

A etapa do fluxo de processamento por meio de *software* específico, conhecida como triangulação aérea, inclui a autocalibração da câmara, nomeadamente para correção da distância focal. Como esse parâmetro se relaciona com a altitude da câmara, facilmente se gera uma incerteza na componente altimétrica das coordenadas que não pode ser negligenciada. Portanto, como a opção de autocalibração geralmente está definida por defeito nos principais *softwares* de processamento aerofotogramétrico, é cabível uma investigação mais profunda do impacto que esta escolha causa na acurácia posicional dos produtos gerados.

1.1 Motivações e Objetivos

Por defeito, os UAVs vêm de fábrica com seus parâmetros de orientação interior já calibrados, que são iguais para qualquer unidade de um mesmo modelo, não sendo diferente no caso do Phantom 4 RTK. No entanto, será mesmo possível que em uma linha de produção em série destes equipamentos, todos tenham exatamente os mesmos valores de calibração dos parâmetros? Pressupõe-se que não.

Pode-se iniciar tal investigação ao mensurar o impacto causado pela calibração original dos parâmetros de orientação interior da câmara do Phantom 4 RTK, mais especificamente a distância focal, na acurácia altimétrica de modelos digitais de elevação. Ademais, pode-se também comparar este resultado com o obtido após aplicação do recurso de autocalibração do *software* Metashape, no mesmo cenário, na tentativa de obter parâmetros de calibração mais fiáveis que os originais.

Desta forma, objetiva-se estabelecer uma metodologia de fluxo aerofotogramétrico que garanta um elevado rigor posicional, enquanto minimiza o trabalho de campo para recolha de pontos de apoio aplicáveis ao Phantom 4 RTK, modelo amplamente utilizado em trabalhos aerofotogramétricos que exigem alta acurácia posicional.

1.2 Estrutura

Além do capítulo anterior, referente à “Introdução”, este trabalho contém ainda mais quatro capítulos e um anexo.

No capítulo 2 são definidos alguns conceitos teóricos referentes aos principais termos e técnicas que constituem a base para esta dissertação, onde se aborda mais detalhes sobre o *Structure-from-Motion*, o processo de triangulação aérea e a orientação interior de uma câmara.

No capítulo 3 descreve-se os materiais e metodologias utilizadas, bem como as áreas de estudo envolvidas, indicando assim todas as etapas percorridas para a geração dos resultados posteriores. Este capítulo mostra tanto os cenários escolhidos na parte de campo, como as ferramentas e *softwares*

de processamento de dados utilizados.

Seguindo para o capítulo 4, aborda-se de facto os resultados obtidos no trabalho, analisando as razões por trás dos mesmos e comparando-os entre si.

Por fim, no capítulo 5, conclui-se esta dissertação com base em todos os resultados obtidos e sugere-se trabalhos futuros para fins de expansão dos conhecimentos nos temas relacionados.

2 Fundamentação teórica

2.1 *Structure-from-Motion*

Trata-se de um método fotogramétrico muito utilizado e de baixo custo para reconstrução topográfica de alta resolução espacial, ideal para pesquisas e trabalhos com baixo orçamento e aplicação em áreas remotas. O método *Structure-from-Motion* (SfM) opera sob os mesmos princípios básicos da fotogrametria estereoscópica, ou seja, a estrutura tridimensional do objeto em estudo pode ser definida a partir de uma série de imagens sobrepostas e deslocadas umas em relação às outras (Figura 1). No entanto, difere fundamentalmente da fotogrametria convencional, pois a geometria da cena, as posições da câmara e sua orientação são calculadas automaticamente sem a necessidade de especificar, *a priori*, uma rede de alvos que possuem posições tridimensionais conhecidas. Em vez disso, estes parâmetros são calculados simultaneamente em um processo chamado de "aerotriangulação". Tal processo leva como base uma técnica de estatística conhecida como "ajustamento de observações", que é altamente redundante e iterativa, tomando como base as informações extraídas de forma automática de cada pixel de um conjunto de múltiplas imagens sobrepostas [16].

Conforme ilustrado abaixo, a abordagem é mais adequada para conjuntos de imagens com uma alta percentagem de sobreposição, que capturam a estrutura tridimensional completa da cena (ou objeto) vista de diversas posições ou, como o nome sugere, imagens derivadas de um sensor que esteja em movimento.

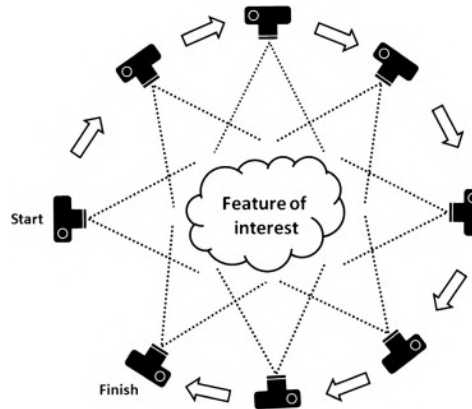


Figura 1: Structure-from-Motion (SfM). A técnica SfM exige múltiplas fotografias sobrepostas como entrada (*input*) para algoritmos de extração de feições e reconstrução 3D.

2.2 Aerotriangulação

Uma etapa crucial no fluxo de trabalho fotogramétrico é a determinação das posições e atitudes (ângulos) no espaço 3D das imagens capturadas. O processo associado envolve o cálculo dos parâmetros de orientação exterior [17][18], um procedimento analítico muitas vezes referido como "aerotriangulação" [19].

Existem várias abordagens para realizar a orientação exterior, por exemplo: ressecção de imagem e orientação [17]. No entanto, a técnica do ajustamento de observações permite encontrar a solução

para o problema da orientação exterior usando coordenadas de imagem e as condições de colinearidade. Matematicamente falando, o ajustamento de observações é um problema de otimização não linear de mínimos quadrados aplicado simultaneamente à estimativa das coordenadas tridimensionais dos pontos na imagem e aos parâmetros exteriores da câmara, incluindo potencialmente os parâmetros interiores [20]. Neste último caso, o processo de ajustamento às vezes é chamado de “autocalibração”. Tal ajustamento pode envolver pontos de controlo, bem como dados derivados do GNSS e INS embarcados na aeronave. Qualquer observação pode também ser ponderada de acordo com sua precisão [21]. Isto permite uma solução rigorosa para o problema da orientação exterior.

Em geral, duas abordagens para realizar o ajustamento de observações podem ser seguidas [20][22]:

1. Ajustamento de redes livres: A abordagem livre envolve o cálculo dos parâmetros exteriores em um sistema de coordenadas arbitrário, seguido por uma transformação de similaridade tridimensional para alinhar a rede ao sistema de coordenadas do ponto de controlo. Na fotogrametria aérea clássica, essa abordagem compõe as etapas de orientação relativa (orientação livre da rede) e orientação absoluta (transformação de similaridade).
2. Ajustamento por blocos: A abordagem por blocos envolve uma estimativa simultânea por mínimos quadrados das coordenadas tridimensionais do ponto, os parâmetros exteriores da câmara e, opcionalmente, os parâmetros interiores da câmara, no sistema de coordenadas dos pontos de controlo. Isso é feito introduzindo pelo menos três pontos de controlo e integrando-os dentro da matriz computacional. Essas observações podem necessitar de ponderações apropriadas.

A abordagem de redes livres é menos rigorosa do que a abordagem por blocos, sendo possível que deformações no modelo possam ocorrer devido à falta de restrição exterior e/ou calibração imperfeita dos parâmetros interiores da câmara [20][23]. No entanto, o método de redes livres é mais rápido pois envolve menos observações e, portanto, muitas vezes é realizado como uma etapa inicial usando uma quantidade mínima de pontos de controlo. A orientação arbitrária resultante deste processo pode então ser usada para guiar outras observações de pontos de controlo. O fluxo de trabalho básico do *software* Agisoft Metashape usa a abordagem de redes livres e a transformação de similaridade tridimensional. Ao contrário, no ajustamento por blocos, os pontos de controlo são levados em conta diretamente no cálculo e uma deformação do modelo é, portanto, menos provável de acontecer, tornando a rede mais estável.

2.3 Orientação interior da câmara

A orientação interior pode ser definida como o processo de reconstrução do feixe perspetivo, ou seja, a referenciação da imagem em relação à câmara. É necessário reconstituir o sistema interno da câmara no momento da tomada das fotografias a fim de que se possa efetuar medidas com precisão sobre as imagens fotográficas.

Para garantir exatidão e confiabilidade nos trabalhos fotogramétricos, deve-se conhecer o grupo de parâmetros necessários à reconstrução do feixe perspetivo gerador da imagem fotográfica no instante da exposição do filme (ou sensor) à luz refletida do objeto fotografado [24][27]. A determinação de

tais parâmetros se faz por um processo de calibração. Calibrar uma câmara significa encontrar um conjunto de parâmetros de orientação interior [25][27], conjunto esse que inclui a modelagem das distorções provocadas pelo sistema de lentes da câmara.

A maioria das formulações em fotogrametria são baseadas na consideração de que os raios de luz que formam as imagens, passando pelo sistema de lentes, e atingem o plano focal, descrevem um caminho retilíneo a partir do espaço objeto. Na prática, o caminho ótico retilíneo não é mantido, devido a vários fatores físicos. As maiores componentes responsáveis por essa condição são as distorções da lente da câmara [27].

Os parâmetros resultantes da calibração descrevem a geometria interna de uma câmara, incluindo a modelagem das distorções provocadas pelas imperfeições das lentes. Para o caso das câmaras digitais, o conjunto principal de parâmetros de orientação interior a ser considerado na calibração destes equipamentos compreende [26][27]:

- f : Distância focal gaussiana equivalente da câmara;
- C_x e C_y : Coordenadas do ponto principal;
- K_1 , K_2 e K_3 : Parâmetros de distorção radial simétrica;
- P_1 e P_2 : Parâmetros de distorção tangencial (ou descentrada).

A distância focal gaussiana equivalente (Figura 2) é a distância obtida pela formação da imagem de um objeto situado no infinito, a qual é obtida no processo de calibração [27].

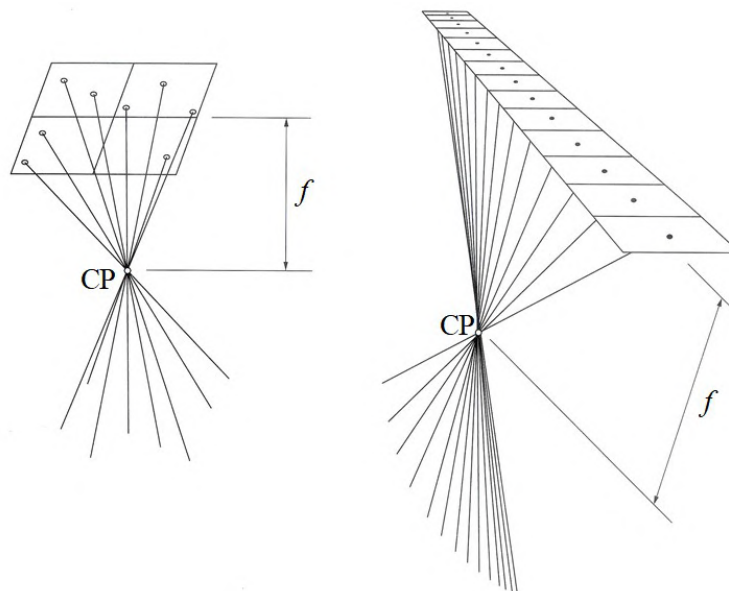


Figura 2: Distância focal gaussiana equivalente (f) em representação conjunta com o centro perspectivo da câmara (CP). (Figura adaptada de [27])

Ao atravessar um sistema ótico, um feixe de luz sofre perturbações que podem prejudicar a qualidade visual ou promover deslocamentos dos pontos no plano imagem [27].

A distorção radial simétrica (Figura 3) é o deslocamento radial de um ponto na imagem de sua posição teoricamente correta, ou seja, uma mudança no ângulo entre o raio de luz e o eixo ótico (O), causada pela refração sofrida pelo raio de luz ao atravessar o sistema ótico [27].

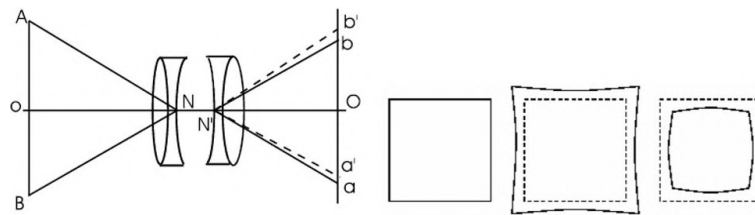


Figura 3: Vista lateral da distorção radial simétrica (esquerda) e seus possíveis efeitos na imagem capturada (direita). (Figura adaptada de [27])

Já a distorção tangencial (Figura 4) ou descentrada é causada pela impossibilidade de alinhamento entre os eixos óticos das lentes que compõem o sistema de lentes, causando um deslocamento na posição de um ponto na imagem [27].

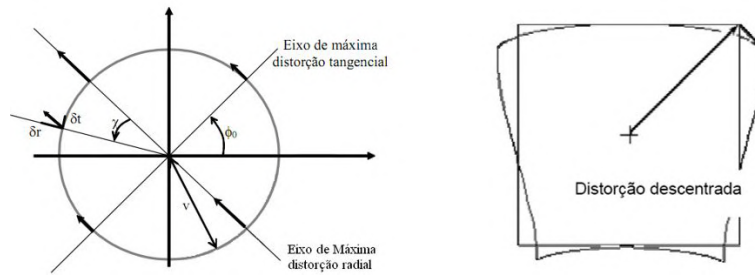


Figura 4: Vista superior da distorção tangencial (esquerda) e seus possíveis efeitos na imagem capturada (direita). (Figura adaptada de [27])

3 Materiais e métodos

3.1 Áreas de estudo

Os locais escolhidos para realizar os levantamentos foram o Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros (Figura 5), localizado em Vila Nova de Gaia, e uma região da cidade de Santa Maria da Feira (Figura 6), localizada no distrito de Aveiro.

O motivo principal para a escolha do observatório foi pelo facto do mesmo possuir vários marcos geodésicos com coordenadas previamente conhecidas, tornando assim mais fiável o levantamento de referência deste trabalho. Para além disso localiza-se lá a estação GNSS Gaia, da Rede Nacional de Estações Permanentes (ReNEP) que foi usada para o posicionamento RTK do drone e para o levantamento dos pontos de apoio. Como temos uma distância à base muito curta (da ordem da centena de metros) a precisão do posicionamento será muito boa. Isso é importante para o levantamento que dá origem aos parâmetros de calibração da câmara.

Já a região de Santa Maria da Feira foi escolhida por proporcionar espaço aéreo mais acessível quando comparada aos grandes centros urbanos, bem como por apresentar sinalização horizontal de trânsito relativamente nova e bem definida, a qual foi usada para a coleta de pontos de verificação usando GNSS. A estação da ReNEP mais próxima do local ficava relativamente longe e por isso foi utilizada a rede de estações Hexagon Smartnet. Trata-se de uma rede comercial, mas para a qual a Faculdade de Ciências recebeu uma licença temporária para testes. Utilizou-se quer para o posicionamento do drone, quer para o levantamento de pontos porque é fundamental que o posicionamento RTK do drone e o levantamento dos pontos de apoio ou de verificação sejam feitos relativamente à mesma estação fixa.

Em relação às alturas de voo, no observatório há uma restrição de 80 metros de altura máxima, portanto foi utilizada uma altura próxima desse valor. Houve a preocupação de não utilizar uma altura muito baixa porque poderia originar um tamanho de pixel no terreno muito pequeno, menor que o grau de incerteza do posicionamento GNSS. Assim, os pontos de apoio acabariam por introduzir algum erro indesejável.

Em Santa Maria da Feira a restrição à altura de voo era a dos 120 metros - máxima definida pela legislação - tendo por isso sido usada uma altura próxima desse valor, que originou um GSD (*Ground Sample Distance*) de cerca de 3 cm/pixel.



Figura 5: Área de Estudo - Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros.



Figura 6: Área de Estudo - Secção da cidade de Santa Maria da Feira, no Distrito de Aveiro.

3.2 Metodologia

Como já mencionado anteriormente, no observatório existe uma série de marcos geodésicos com coordenadas previamente conhecidas, sendo um total de 13 marcos (Figura 7). Tais marcos foram usados posteriormente como pontos de verificação (checagem) da acurácia posicional do modelo gerado. No entanto, foram coletados, com um recetor GNSS, alguns pontos de apoio extras (7 pontos) com o intuito de serem usados como pontos de controlo na etapa de aerotriangulação durante o processamento dos dados.

O software de planeamento de voo do Phantom 4 RTK possui uma opção de “Optimize altitude”, que foi utilizada. Nesse modo o drone finaliza o voo com a recolha de algumas fotos oblíquas, no regresso ao centro da área levantada. Numa área retangular será ao longo de uma semi-diagonal do retângulo, ou seja, o número de fotos oblíquas depende da forma da área levantada. O ângulo de inclinação dessas fotos é de 45 graus e não pode ser alterado pelo utilizador. Para testar com outras inclinações haveria que fazer um voo adicional, com a câmara intencionalmente oblíqua, o que não foi feito. As fotos da semi-diagonal foram suficientes para o estudo pretendido.



Figura 7: Pontos de verificação (branco) e pontos de controlo (vermelho) usados no observatório.

O voo realizado com o Phantom 4 RTK sobre o observatório resultou em 51 fotos, sendo 46 verticais e 5 oblíquas, com uma altura de voo média de 68,9 m e GSD de 1,7 cm/pixel.

Na sequência os dados do GNSS e do UAV foram transferidos para um computador, onde o *software* Agisoft Metashape foi utilizado para o processamento de quatro cenários específicos:

- 1a Sem pontos de controlo, com a fixação dos parâmetros originais da câmara e apenas fotos verticais;

- 1b Sem pontos de controlo, sem a fixação dos parâmetros originais da câmara e apenas fotos verticais;
- 1c Sem pontos de controlo, sem a fixação dos parâmetros originais da câmara e incluindo fotos oblíquas;
- 1d Com pontos de controlo, sem a fixação dos parâmetros originais da câmara e incluindo fotos oblíquas.

Ao executar o processamento destes quatro cenários, tinha-se duas intenções: comparar a qualidade posicional entre eles, com o foco na altimetria, e através deste resultado definir a metodologia de processamento dos voos e cenários subsequentes, em Santa Maria da Feira. Ou seja, o observatório serviria então como um levantamento base para criação de hipóteses acerca da influência dos POIs na acurácia posicional do modelo, ao passo que Santa Maria da Feira serviria como cenário de validação das hipóteses estabelecidas.

Como no cenário “1d”, além de incluir pontos de controlo também haviam fotos oblíquas no processamento - consequentemente tendo maior redundância de informações - foi gerado então um ficheiro denominado “*cam.xml*”, contendo novos POIs calculados pelo Metashape na etapa de aerotriangulação. Tal ficheiro foi usado posteriormente para processar as imagens de Santa Maria da Feira em dois dos cenários estabelecidos.

Na área escolhida da cidade de Santa Maria da Feira foram levantados, com GNSS, um total de 26 pontos de verificação, de forma a abranger homoganeamente a área de estudo (Figura 8).



Figura 8: Pontos de verificação distribuídos de maneira homogênea.

Após o voo, realizou-se então outra sequência de processamentos das imagens capturadas pelo Phantom 4 RTK, com o mesmo *software*, em outros quatro cenários:

- 2a Sem pontos de controlo, sem a fixação dos parâmetros originais da câmara e apenas fotos verticais;

- 2b Sem pontos de controlo, sem a fixação dos parâmetros originais da câmara e incluindo fotos oblíquas;
- 2c Sem pontos de controlo, a fixar os novos parâmetros da câmara obtidos no cenário “1d” do observatório (ficheiro “*cam.xml*”) e apenas fotos verticais;
- 2d Sem pontos de controlo, a fixar os novos parâmetros da câmara obtidos no cenário “1d” do observatório (ficheiro “*cam.xml*”) e incluindo fotos oblíquas

O facto de se utilizar apenas pontos de verificação é justamente pelo intuito de mensurar a qualidade posicional de um levantamento aéreo com este modelo de UAV em um cenário de bem poucos, ou até mesmo nenhum, ponto de controlo, minimizando assim drasticamente o trabalho de campo, enquanto se mantém elevado rigor posicional.

Ao fim dos devidos processamentos já mencionados, o produto exportado foi o modelo digital de elevação (DEM) das duas áreas de estudo (Figuras 9 e 10), servindo assim como referência para geração e comparação dos resultados subsequentes.

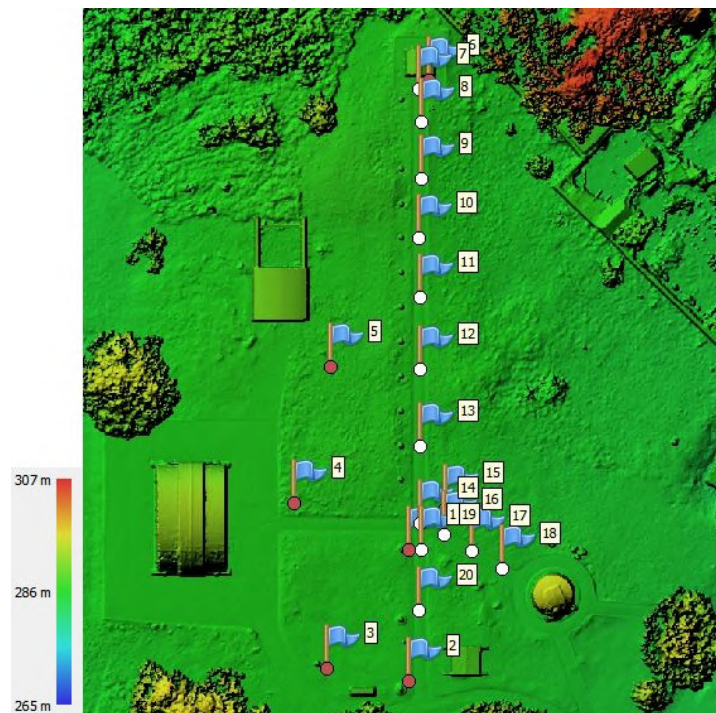


Figura 9: Modelo digital de elevação - Observatório.



Figura 10: Modelo digital de elevação - Santa Maria da Feira.

Para extrair os valores altimétricos dos DEMs em cada ponto de verificação usado, utilizou-se o *software* livre QGIS por meio da ferramenta denominada *Point Sampling Tool*. Esta ferramenta recebe como entrada de dados um ficheiro de pontos (os pontos de verificação) e outro ficheiro do tipo *raster* (o DEM). Assim, extraiu-se do *raster* os valores que se tem interesse, tomando como base a posição dos pontos inseridos. Por este motivo, foi de suma importância que ambos os ficheiros estivessem no mesmo sistema de coordenadas, neste caso o “PT-TM06/ETRS89”.

Os valores obtidos foram então inseridos em uma planilha eletrônica para o cálculo do *Root-Mean-Square Error* (RMSE) ou - “raiz do erro quadrático médio” - em cada cenário estudado, nas duas áreas. Por fim, comparou-se os erros entre si, gerando tabelas e gráficos para melhor interpretação e visualização dos resultados. Com auxílio do *software* Metashape também foi possível produzir os gráficos das distorções radial e descentrada nos cenários onde era importante esta verificação.

4 Resultados e discussões

4.1 Observatório astronómico

No observatório, ou seja, na primeira área de estudo, realizou-se o processamento dos dados nos quatro cenários citados. No primeiro deles (1a), para além da não utilização de qualquer ponto de controlo, também fixou-se os POIs originais fornecidos pela fabricante do UAV e utilizou-se apenas fotos tomadas na posição vertical. Após geração do modelo digital de elevação sob essas condições, observou-se que o RMSE da altimetria foi de 0,839 metros (83,9 centímetros), tendo em consideração os 20 pontos presentes, usados como verificação.

Já no cenário “1b”, manteve-se a não utilização de pontos de controlo e apenas fotos verticais, sendo a única diferença o facto de não serem fixados os POIs. Nesta situação, o *software* de processamento ficou livre para recalculer novos parâmetros da câmara durante o processo de aerotriangulação. Sob tais condições, o RMSE altimétrico foi de 1,003 metros, evidenciando um aumento de 19,5% na incerteza das coordenadas do DEM produzido, quando comparado com o primeiro cenário.

No cenário “1c”, duas condições se mantêm em relação ao experimento anterior: a ausência de pontos de controlo e a liberdade para que o programa utilizado alterasse os POIs originais da câmara. Difere-se, porém, o facto de que foram adicionadas também as 5 fotos tomadas em posição oblíqua (aproximadamente 60°). É neste momento que os resultados começam a ficar bastante promissores, pois o modelo digital gerado atingiu um RMSE de 0,026 metros (2,6 centímetros) na altimetria do observatório - um aprimoramento de 97,4% na acurácia altimétrica das coordenadas, quando comparada ao cenário com o pior desempenho até então (1b).

Por fim, ao processar o cenário “1d”, utilizou-se 6 pontos de controlo e permitiu-se a alteração dos POIs iniciais, além de incluir as mesmas 5 fotos capturas em posição oblíqua. O RMSE alcançado neste caso foi de 0,017 metros (1,7 centímetros), mostrando uma melhora de 34,6% em relação ao cenário anterior.

O resumo dos resultados obtidos para a área do observatório astronómico se encontra na Tabela 1, a seguir.

Cenário	RMSE (m)	Dif. p/ pior cenário (%)
1a	0,839	-16,4
1b	1,003	-
1c	0,026	-97,4
1d	0,017	-98,3

Tabela 1: Resumo dos resultados obtidos nos quatro cenários do observatório.

Fica então bastante evidente como a fixação dos parâmetros originais fornecidos pela fabricante do UAV, a DJI, não são tão fiáveis, pois produziram uma incerteza de 83,9 centímetros nas coordenadas do modelo digital gerado. Tal facto pode ser atribuído, principalmente, às já mencionadas distorções radial e descentrada, que ocorrem devido à imperfeições nas lentes da câmara e falta de alinhamento

entre elas.

Os gráficos das figuras seguintes exibem como ambas as distorções aumentam quando se afasta do centro das imagens, sendo a distorção radial muito mais acentuada que a descentrada, em todos os casos. Nas Figuras 11 e 12, vê-se que os valores atingem cerca 500 e 2,5 pixels para as distorções radial e descentrada, respectivamente, quando se fixa os parâmetros originais da câmara.

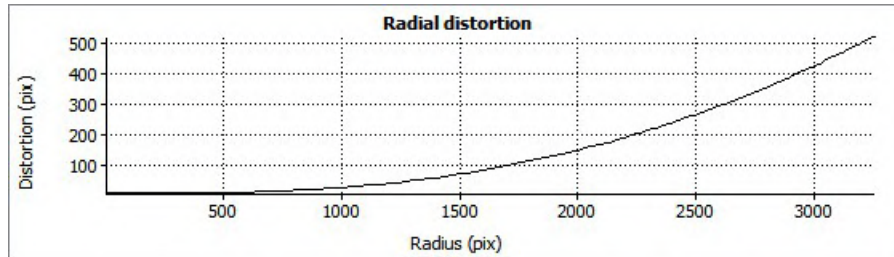


Figura 11: Distorção radial (em pixels) para os parâmetros originais da câmara.

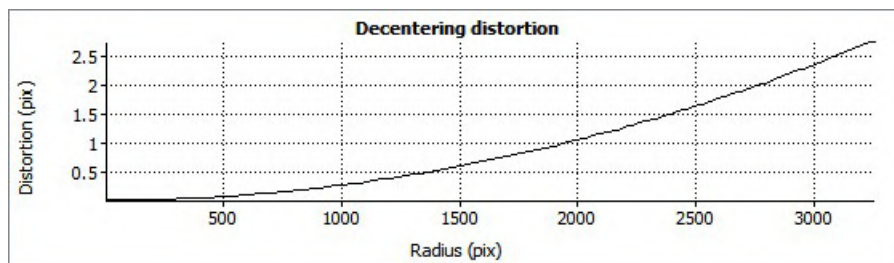


Figura 12: Distorção descentrada (em pixels) para os parâmetros originais da câmara.

Por outro lado, no cenário “1d”, onde os POIs foram estimados pelo *software* e gravados no ficheiro “*cam.xml*”, as distorções se alteraram de forma perceptível. Apesar da Figura 13 mostrar uma distorção radial máxima muito semelhante ao caso anterior - por volta dos 500 pixels - na Figura 14 observa-se como a distorção descentrada é bastante reduzida, ficando próxima dos 0,8 pixels em seu ponto mais alto. O motivo desta melhora vem do facto de que os novos POIs estimados se originaram em um cenário com pontos de controlo e fotos oblíquas, em um ambiente bastante controlado e de alta fiabilidade posicional e geométrica: o observatório astronómico.

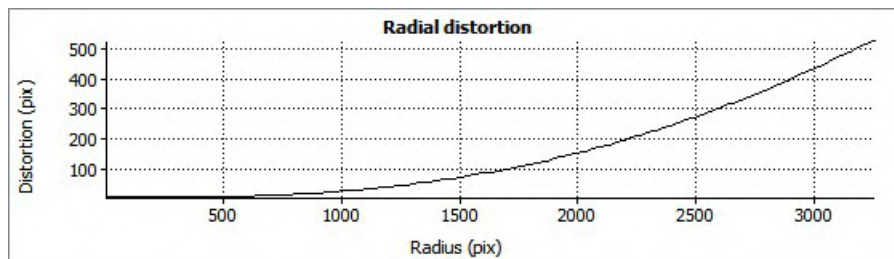


Figura 13: Distorção radial (em pixels) para os parâmetros da câmara estimados.

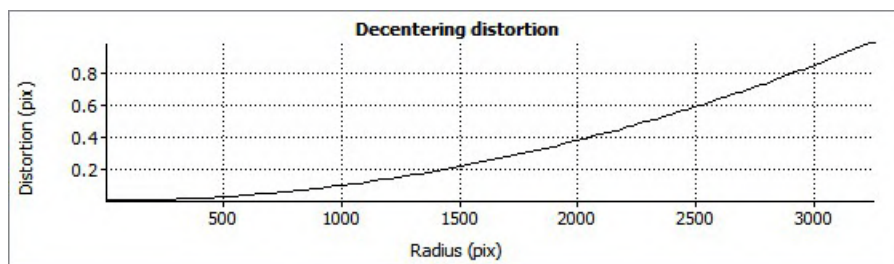


Figura 14: Distorção descentrada (em pixels) para os parâmetros da câmara estimados.

4.2 Santa Maria da Feira

Ao avançar para a área de Santa Maria da Feira, temos também quatro cenários que serviram para validação das hipóteses levantadas no observatório. É importante ressaltar que aqui não se utilizou nenhum dos pontos de apoio como controlo, sendo todos os 26 pontos coletados com GNSS usados apenas como pontos de verificação.

No primeiro cenário estudado, denominado “2a”, não houve fixação dos parâmetros de orientação interior da câmara do UAV, porém utilizou-se apenas fotos tomadas em posição nadir. O RMSE altimétrico alcançado no DEM foi de 0,563 metros (56,3 centímetros).

No cenário “2b”, a única diferença para o caso anterior foi a adição de 20 fotos da área, tomadas em posição oblíqua, com aproximadamente 60° de inclinação em relação ao horizonte. Na altimetria, o modelo digital de elevação atingiu 2,4 centímetros de RMSE, uma diferença de 95,8% em relação à situação anterior.

Os cenários “2c” e “2d” são bastante similares, diferindo apenas no facto de que o primeiro utiliza somente fotos verticais, enquanto o segundo adiciona novamente as 20 fotos oblíquas. No entanto, em ambos utilizou-se o ficheiro “cam.xml”, gerado no cenário “1d”, como sendo os POIs fixados durante o processamento, sem permitir qualquer tipo de alteração durante a etapa de aerotriangulação. O cenário “2c” apresentou um RMSE altimétrico de 1,9 centímetros, uma melhora de 96,6% em relação ao pior cenário, enquanto o “2d” alcançou RMSE de 1,8 centímetros na altimetria do DEM. Enfatiza-se que, na comparação entre estes dois últimos cenários, houve uma melhora relativa de 5,3%.

O resumo dos resultados obtidos para a área de Santa Maria da Feira se encontra na Tabela 2, a seguir.

Cenário	RMSE (m)	Dif. p/ pior cenário (%)
2a	0,563	-
2b	0,024	-95,8
2c	0,019	-96,6
2d	0,018	-96,7

Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos nos quatro cenários em Santa Maria da Feira.

Ao avaliar especificamente o valor da distância focal ajustada (em pixels) no ficheiro “cam.xml”, nota-se um aumento de 13,21 pixels em relação ao valor original, conforme a Tabela 3.

	Original (Pix)	Ajustado (Pix)	Δ (Pix)
f	3688,57	3701,78	13,21

Tabela 3: Diferença entre distância focal original e ajustada.

Como o voo que originou o ficheiro “*cam.xml*” foi a uma altura de aproximadamente 60 metros, ao tomar como base a relação existente entre distância focal (f), altura de voo (H) e escala (E) (Equação 1), o aumento na distância focal estaria elevando a altura de voo para 60,21 metros. Na prática, isso revela um aumento do RMSE em 21 centímetros, justificando parcialmente o RMSE encontrado no cenário “1a”, que foi de 83,9 centímetros. Os outros parâmetros interiores da câmara também são muito alterados e poderão estar a contribuir para a introdução de mais erro.

$$E = \frac{f}{H} \quad (1)$$

Por outro lado, é importante levar em consideração a grande redução do RMSE apenas com a adição das fotos oblíquas. Isso se justifica pois a razão f/H presente na Equação 1 é praticamente a mesma em todas as fotos. Então, como existe o ajuste em f no processo de autocalibração, um valor ligeiramente errado é compensado por uma altura de voo ajustada e, devido aos pesos da posição da câmara serem altos no processo de ajustamento de observações e não haver pontos de controle, a altura determinada fica igualmente alterada, afetando assim as cotas do DEM.

Já quando se inclui as fotos oblíquas, tem-se para essas um valor diferente no H - neste caso não uma altura, mas uma distância ao terreno na direção do eixo ótico. Sendo esse valor denominado H' , há uma razão f/H' diferente. Dessa maneira, ao fazer o ajuste do f já não há liberdade para o efeito ser compensado por uma alteração proporcional no valor de H , levando assim as coordenadas altimétricas do DEM a serem mais acuradas.

5 Conclusão

Quando se fala sobre mapeamento com a utilização de UAVs, dois fatores principais têm que ser levados em conta, sendo eles tempo e fiabilidade. Portanto, os resultados produzidos neste trabalho sempre visaram a redução do tempo gasto em um projeto de aerofotogrametria com UAVs, principalmente na parte de campo, mantendo um alto nível de qualidade posicional nos produtos gerados.

Os resultados citados no capítulo anterior indicam que os parâmetros de orientação da câmara, informados pela fabricante DJI para o modelo Phantom 4 RTK, não são os mais fiáveis a serem utilizados. Sendo assim, permitir que os *softwares* de processamento recalculam tais parâmetros é sempre uma recomendação sensata. Por outro lado, este procedimento não se justifica quando não se utiliza algumas fotos oblíquas da área de estudo ou pontos de controlo, pois observou-se que os RMSEs nestes cenários foram os mais altos deste trabalho, sendo cerca de 1 metro no observatório astronómico e 56,3 centímetros em Santa Maria da Feira.

No entanto, uma grande mudança nos resultados ocorreu quando fotos oblíquas, com uma inclinação aproximada de 60° , foram adicionadas ao processamento, atingindo RMSEs de apenas 2,6 e 2,4 centímetros, mesmo com a ausência de pontos de controlo. Fica bastante evidenciado que o uso de fotos oblíquas nos mapeamentos aéreos aumentaram, por si só, a acurácia altimétrica em mais de 90%.

Por fim, foi possível reduzir ainda mais o RMSE da altimetria em Santa Maria da Feira, quando se utilizou os novos parâmetros de orientação interior da câmara previamente ajustados para um cenário bastante controlado (o observatório). Isso demonstra o potencial na redução de erros posicionais ao se usar uma “área de controlo” como levantamento prévio em mapeamentos aéreos de alta precisão.

Conclui-se que, um fluxo de trabalho muito interessante para balancear uma alta acurácia posicional e ainda assim levar a uma drástica redução do trabalho de campo, ao se utilizar o UAV Phantom 4 RTK, seria constituído pela realização de um levantamento prévio em uma área controlada, utilizando fotos oblíquas e vários pontos de apoio (controlo e verificação) bem distribuídos pelo terreno e rastreados com equipamento GNSS de alta precisão. Em seguida, processar os dados, permitindo que o *software* ajuste os POIs originais da câmara e, então, gravar um ficheiro contendo estes novos parâmetros calculados. Por fim, usar este ficheiro gerado como parâmetros fixos em todos os processamentos posteriores, em qualquer área de interesse mapeada pelo usuário. Deve-se estar sempre atento na tomada de fotos oblíquas em todas as situações possíveis.

Para estudos futuros, sugere-se a verificação da degradação temporal destes novos parâmetros de orientação interior calculados. Seria interessante investigar por quanto tempo os novos POIs se mantêm fiáveis, visto que a câmara presente no UAV sofre pequenos impactos, mesmo com o bom uso, além de variações de temperatura, umidade e pressão de acordo com o local onde é utilizado. Tais fatores poderiam, ao longo do tempo, modificar o posicionamento absoluto e relativo das lentes da câmara, sendo provavelmente necessários uma intervenção e recálculo dos POIs. Ademais, torna-se relevante testar o mesmo fluxo de trabalho apresentado neste trabalho, porém em outros modelos de UAV embarcados com GNSS operável em modo RTK.

Referências

- [1] Regulamento Delegado (UE) 2019/945 da comissão de 12 de março de 2019, relativo às aeronaves não tripuladas e aos operadores de países terceiros de sistemas de aeronaves não tripuladas. Acedido em 03 de Janeiro de 2022, em:
https://www.anac.pt/SiteCollectionDocuments/UAS_DRONES/04_REG_UE_2019_945_M1.pdf.
- [2] Toth, C. e Józków, G. 2016. Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>.
- [3] James, M. R. e Robson, S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1413-1420, <https://doi.org/10.1002/esp.3609>.
- [4] Carbonneau, P. E. e Dietrich, J. T. 2017. Cost-effective nonmetric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), 473-486, <https://doi.org/10.1002/esp.4012>.
- [5] Hese, S., Behrendt e F. 2017. Multiseasonal tree crown structure mapping with point clouds from OTS quadrocopter systems. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 42, 141-143, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-141-2017>.
- [6] DJI, 2022. Fabricante de Drones DJI (Série Phantom). Acedido em 07 de Janeiro de 2022, em:
<https://www.dji.com/pt/support/product?site=brandsite&from=footer>
- [7] Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., Hench, J. L., Rovere, A. 2017. Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, 36(1), 269-275, <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1522-0>.
- [8] Ewertowski, M. W., Tomczyk, A. M., Evans, D. J. A., Roberts, D. H., Ewertowski, W. 2019. Operational Framework for Rapid, Very-high Resolution Mapping of Glacial Geomorphology Using Low-cost Unmanned Aerial Vehicles and Structure-from-Motion Approach. *Remote Sensing*, 11(1), 65, <https://doi.org/10.3390/rs11010065>.
- [9] Malambo, L., Popescu, S. C., Murray, S. C., Putman, E., Pugh, N. A., Horne, D. W., Richardson, G., Sheridan, R., Rooney, W. L., Avant, R., Vidrine, M., McCutchen, B., Baltensperger, D., Bishop, M. 2018. Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 31-42, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.014>.
- [10] Chiabrando, F. e Losè, L. T. 2017. Performance evaluation of COTS UAV for architectural heritage documentation. A test on S. Giuliano Chapel in Savigliano (CN) - Italy. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 42, 77-84, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-77-2017>.

- [11] Dall'Asta, E., Forlani, G., Roncella, R., Santise, M., Diotri, F., Morra di Cella, U. 2017. Unmanned Aerial Systems and DSM matching for rock glacier monitoring. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 127(1), <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.10.003>.
- [12] Shaw, L.; Helmholz, P.; Belton, D.; Addy, N. Comparison of UAV lidar and imagery for beach monitoring. In *Proceedings of the ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Enschede, The Netherlands, 10–14 June 2019; Volume XLII-2/W13, pp. 589–596.
- [13] Gabrlik, P. The Use of Direct Georeferencing in Aerial Photogrammetry with Micro UAV. In IFAC-PapersOnLine, *Proceedings of the 13th IFAC and IEEE Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*, Cracow, Poland, 13–15 May 2015; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; Volume 48, pp. 380–385.
- [14] Habib, A.; Pullivelli, A.; Mitishita, E.; Ghanma, M.; Kim, E.M. Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different georeferencing techniques. *Photogramm. Rec.* 2006, 21, 29–43.
- [15] Habib, A.; Schenk, T. Accuracy analysis of reconstructed points in object space from direct and indirect exterior orientation methods. In *OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation; Federal Agency for Cartography and Geodesy BKG*: Frankfurt, Germany, 2001; pp. 17–18.
- [16] Snavely, N., 2008. Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections, *unpublished PhD thesis*, University of Washington, USA.
- [17] Grussenmeyer, P.; Al Khalil, O. Solutions for exterior orientation in photogrammetry: A review. *Photogramm. Rec.* 2002, 17, 615–634.
- [18] Schenk, T. *Introduction to Photogrammetry*; Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, 2005; pp. 79–95.
- [19] Wolf, P.; DeWitt, B.; Wilkinson, B. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2014; p. 696.
- [20] Remondino, F.; Del Pizzo, S.; Kersten, T.P.; Troisi, S. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation - a critical overview. *Prog. Cult. Herit. Preserv.* 2012, 7616 LNCS, 40–54.
- [21] Granshaw, S.I. Photogrammetric Terminology: Third Edition. *Photogramm. Rec.* 2016, 31, 210–252.
- [22] Granshaw, S.I. Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry. *Photogramm. Rec.* 1980, 10, 181–207.
- [23] Bedford, J. *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage*; Historic: Swindon, UK, 2017; p. 128.
- [24] ANDRADE, J. B.. *Fotogrametria*. Curitiba; SBEE, 2003. 2^a edição.
- [25] Brown, D.C., 1966. *Decentering distortion of lenses*. Photogrammetric Engineering, 32(3):444–462.

- [26] BAZAN, W. S. *Calibração de um Sistema Dual de Câmaras Digitais*. 2008. Dissertação (Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- [27] MEDEIROS, NILCILENE DAS GRAÇAS, Apontamentos de aula de Fotogrametria I (EAM 470). *Capítulos 8 e 9 - Orientação Interior*. Universidade Federal de Viçosa, 2017.

Anexo 1

Observatório Astronómico - Cenário "1d"

Com pontos de controlo, POIs livres e fotos oblíquas
24 September 2022



Survey Data

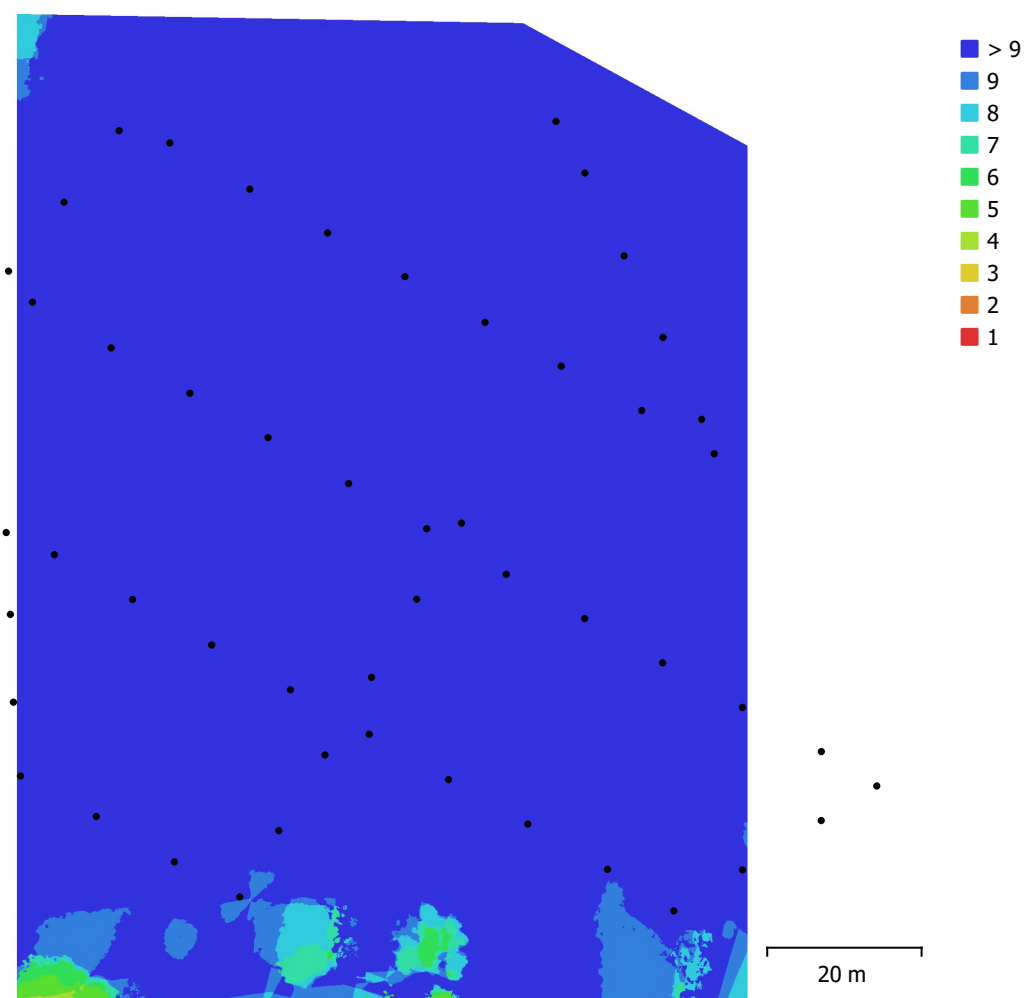


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	51	Camera stations:	51
Flying altitude:	68.9 m	Tie points:	32,768
Ground resolution:	1.67 cm/pix	Projections:	169,917
Coverage area:	0.0118 km ²	Reprojection error:	0.64 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

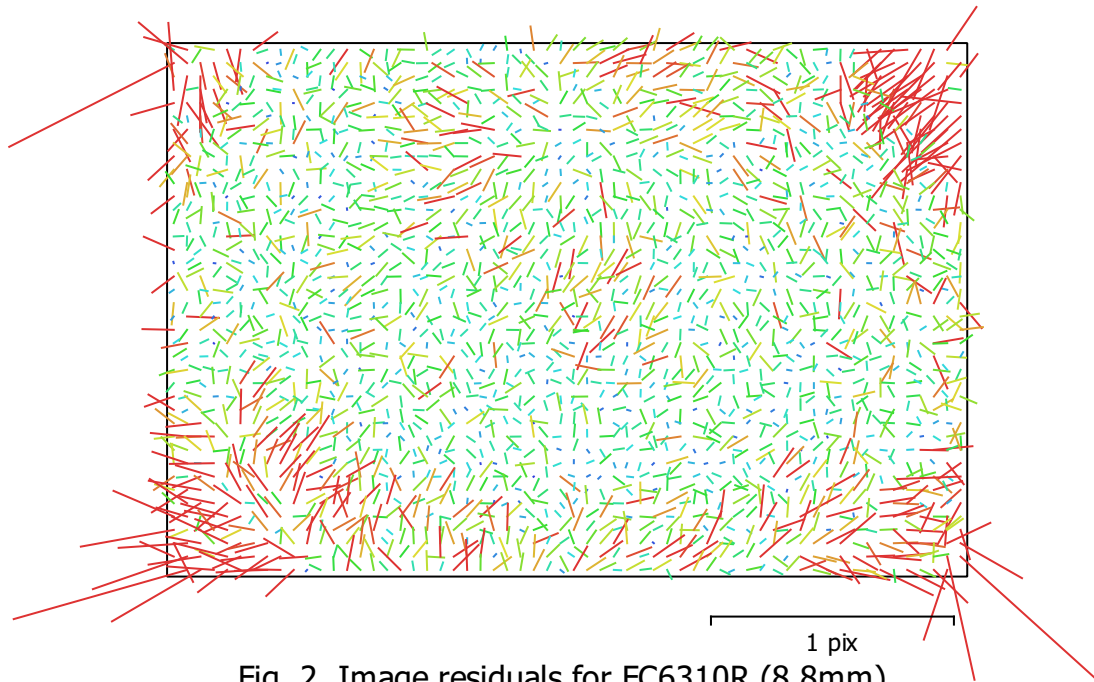


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

51 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3701.78	0.047	1.00	0.01	-0.13	-0.39	0.31	-0.27	0.25	-0.02	0.04
Cx	-1.26639	0.031		1.00	0.01	0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.02	-0.02
Cy	-1.09527	0.028			1.00	0.01	-0.00	-0.00	0.00	-0.02	-0.33
K1	-0.289029	4.7e-05				1.00	-0.97	0.92	-0.87	-0.00	-0.02
K2	0.14905	0.00017					1.00	-0.99	0.96	0.01	0.01
K3	-0.0697335	0.00024						1.00	-0.99	-0.01	0.00
K4	0.0164998	0.00011							1.00	0.01	-0.01
P1	-0.000151656	9.5e-07								1.00	0.06
P2	0.000308278	1.1e-06									1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

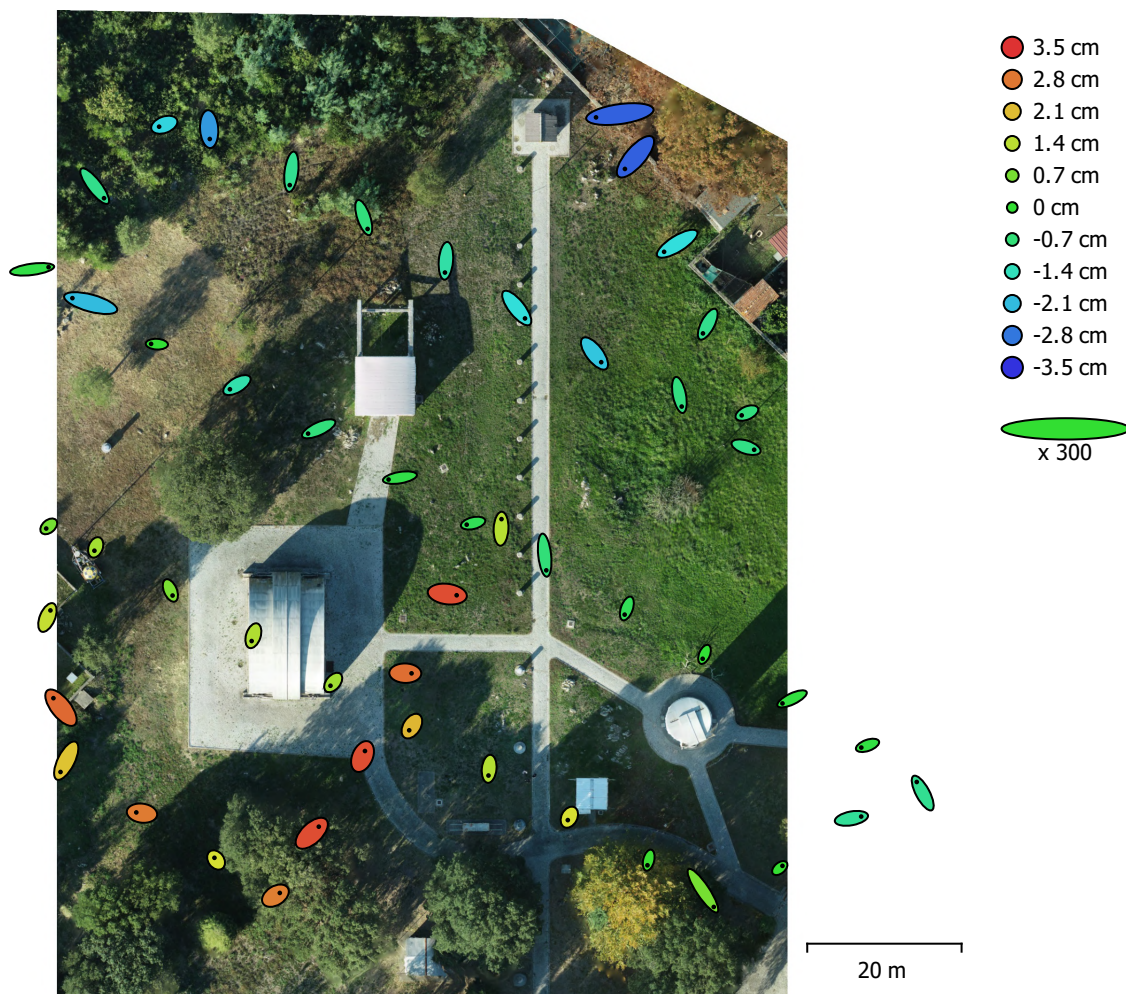


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.657223	0.633333	1.67147	0.912717	1.90444

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Ground Control Points

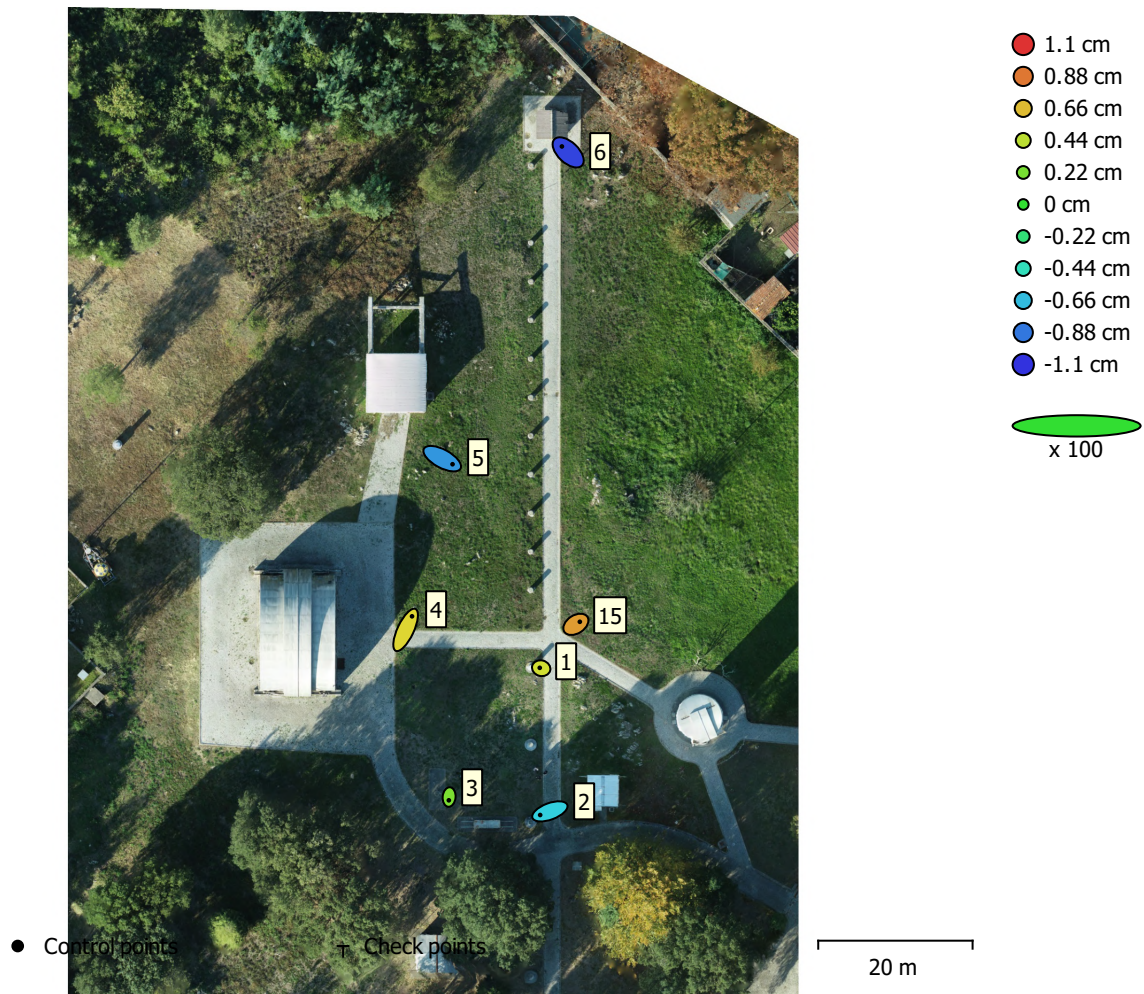


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	1.69344	1.64353	0.685141	2.35986	2.45731

Table 4. Control points RMSE.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1	-0.37072	0.0981825	0.510061	0.63815	0.506 (23)
2	-2.51669	-0.938724	-0.597611	2.75174	0.617 (14)
3	-0.0766923	-0.855021	0.231955	0.889238	0.452 (18)
4	1.66208	3.52087	0.575826	3.93581	0.456 (28)
5	2.67248	-1.44592	-0.779084	3.13685	0.615 (27)
6	-1.62581	1.53795	-1.04498	2.46992	0.852 (13)
15	1.02428	0.658806	0.764391	1.43787	0.656 (24)
Total	1.69344	1.64353	0.685141	2.45731	0.587

Table 5. Control points.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

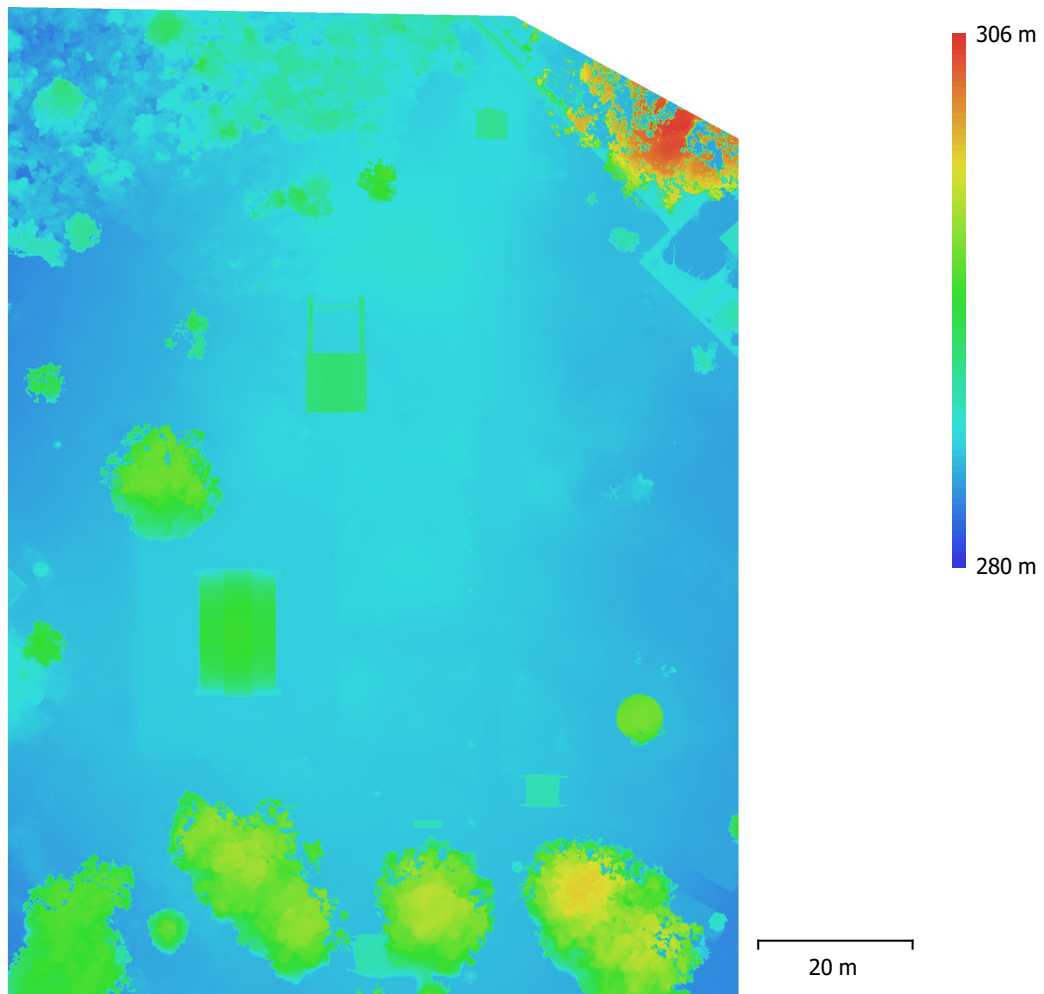


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 3.33 cm/pix
Point density: 901 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	51
Aligned cameras	51
Markers	20

Shapes

Polygons	1
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	32,768 of 37,851
RMS reprojection error	0.161559 (0.639995 pix)
Max reprojection error	0.759097 (22.5746 pix)
Mean key point size	3.12049 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.7799

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	No
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	8 minutes 0 seconds
Matching memory usage	179.34 MB
Alignment time	29 seconds
Alignment memory usage	6.98 MB

Optimization parameters

Parameters	f, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	1 seconds
Software version	1.7.0.11736
File size	4.20 MB

Depth Maps

Count	51
-------	----

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Processing time	23 minutes 8 seconds
Memory usage	5.45 GB
Software version	1.7.0.11736
File size	350.88 MB

Dense Point Cloud

Points	35,993,454
Point colors	None

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Aggressive

Processing time	23 minutes 8 seconds
Memory usage	5.45 GB
Dense cloud generation parameters	
Processing time	11 minutes 39 seconds
Memory usage	3.48 GB
Software version	1.7.0.11736
File size	379.80 MB
DEM	
Size	9,776 x 9,795
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	38 seconds
Memory usage	313.36 MB
Software version	1.7.0.11736
File size	144.64 MB
Orthomosaic	
Size	14,634 x 16,688
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	19 minutes 18 seconds
Memory usage	3.38 GB
Software version	1.7.0.11736
File size	1.78 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.7.0 build 11736
OS	Windows 64 bit
RAM	31.92 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4810MQ CPU @ 2.80GHz
GPU(s)	GeForce GTX 870M